
James Jeans
HISTORIA DE LA FÍSICA
Hasta mediados del siglo xx
BREVIARIOS

BREVIARIOS

del

FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

84

HISTORIA DE LA FÍSICA

Hasta mediados del siglo XX

Traducción de
M. HERNÁNDEZ BARROSO

Historia de la física

Hasta mediados del siglo XX

por SIR JAMES JEANS



Primera edición en inglés, 1948
Primera edición en español, 1953
Primera reimpresión, 1960
Segunda reimpresión, 1968
Tercera reimpresión, 1982
Cuarta reimpresión, 1986
Primera edición electrónica, 2016

Título original: *The Growth of Physical Sciense*

Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14738 Ciudad de México

Comentarios:
editorial@fondodeculturaeconomica.com
Tel. (55) 5227-4672




ISBN 978-607-16-4483-1 (ePub)
Hecho en México - *Made in Mexico*

PREFACIO

Hay un gran número de historias amplias y detalladas, tanto de la ciencia en general como de ramas especiales de ésta. La mayor parte de ellas son admirables para el lector científico; pero al profano a veces los árboles le impiden ver el bosque. No he sentido ambición (ni competencia) para aumentar aquel número, pero he pensado que podía probar con provecho a describir las líneas principales de los progresos de la ciencia física, con inclusión de la astronomía y las matemáticas, mas dejando fuera todos los puntos y cuestiones secundarias, y en lenguaje que se aparte lo bastante del vocabulario técnico como para que lo comprendan los lectores que carezcan de conocimientos científicos.

Espero que un libro de esta clase resulte de interés para el lector de cultura general, y acaso también para los que estén comenzando el estudio de la física; y posiblemente para estudiantes de otros temas que deseen saber algo respecto del desarrollo de la ciencia física, qué es lo que ha conseguido y qué es lo que puede conseguir.

J. H. J.

Las páginas de este libro fueron revisadas por el autor, para la última edición en inglés, poco antes de su muerte en septiembre de 1946.

I
LOS REMOTOS COMIENZOS
(5000-600 a. C.)

Nuestra civilización material nos arrastra a gran velocidad hacia un fin que nadie puede prever ni aun sospechar. Esta velocidad crece sin cesar. Los últimos 100 años han visto más cambios que un millar de años del Imperio Romano y más que 100 000 años de la "edad de la piedra". Este cambio, en gran parte, ha provenido de las aplicaciones de la ciencia física, la cual, mediante el empleo del vapor, de la electricidad y del petróleo, y por medio de varias artes industriales, afecta ahora casi todos los momentos de nuestra existencia. Empleada en medicina y en cirugía puede salvarnos la vida, y aplicada a la guerra puede envolvernos en absoluta ruina. En sus aspectos más abstractos ha ejercido poderosa influencia en nuestras filosofías, en nuestras religiones y en nuestra concepción total de la vida.

El presente libro aspira a narrar cómo ha progresado la ciencia física, y a seguir las huellas de la senda por la cual ha alcanzado el poder y la importancia que tiene en el presente. Para hacer esto de un modo completo, debería yo retroceder a las oscuras edades en las que no había en absoluto ciencia física; a los tiempos anteriores a aquellos en que nuestros antepasados habitantes de las cavernas habían comenzado a preguntarse por qué la noche seguía al día, por qué el fuego consumía y por qué el agua corría hacia abajo por las faldas de las montañas.

Esto no puedo hacerlo. La historia primitiva de nuestra especie está oculta en las nieblas del pasado, y los hechos que más nos gustaría conocer acerca de sus primeros días escapan a nuestra investigación. No sabemos, y probablemente jamás po-

dremos saber, qué pueblo o pueblos fueron los primeros que encontraron que el fuego podía producirse por frotamiento o los primeros que descubrieron los principios de la rueda, la vela y la palanca. Pero tenemos aún con nosotros las herramientas y armas que el hombre primitivo dejaba tras de sí en el suelo de sus chozas y de sus cavernas, o enterradas con sus muertos; las pirámides de Egipto y lo que contienen sus tumbas; los edificios, los dibujos y los utensilios domésticos de Susa, de Erech, de Ur y de Cnosos. Por medio de tales fragmentarias supervivencias puede el arqueólogo reconstruir algo de las vidas de estos lejanos pueblos, y encuentra que entre ellos había una ciencia rudimentaria.

La más remota manifestación de cierto interés sistemático por la ciencia proviene de las civilizaciones que existieron en las cuencas del Éufrates y del Nilo en el cuarto y quinto milenio antes de la era cristiana. El hombre se hallaba todavía en el "neolítico" o nueva edad de la piedra, pero estaba próximo a entrar en la "edad del bronce"[1] al aprender cómo endurecer su cobre demasiado blando con una mezcla de estaño, y de qué manera trabajar la aleación resultante para hacer herramientas y armas. Su desarrollo artístico en aquel tiempo iba muy delante de su desarrollo científico, porque ya hacía escultura, alfarería y joyería, y todas ellas demostraban capacidad de un orden superior.

Las dos civilizaciones antes mencionadas eran geográficamente diferentes, pero es difícil que hayan sido por entero ajenas una a otra, ya que sus culturas, sus artes, e incluso sus religiones muestran ciertos rasgos comunes. Gran cantidad de pruebas[2] indican que algún tiempo antes del año 5000 a. C. una raza pacífica, artística y dotada de gran talento abandonó sus moradas de algún punto del Asia Central y descendió a la Mesopotamia, la tierra situada entre los ríos Éufrates y Tigris, la cual es llamada a veces cuna de la raza humana, pero que con

más seguridad se define como la cuna de la civilización humana. Mezclándose con las razas nativas produjeron un nuevo pueblo, los sumerios o súmeros, que elevaron la civilización a nivel superior al que cualquiera de las razas que lo constituyeron hubiera jamás alcanzado. Tenían considerable habilidad ingenieril, como demuestra el sistema de riego que establecieron en la Baja Mesopotamia, probablemente en el quinto milenio a. C. y sus grandes templos y palacios. Incluso en el quinto milenio (a. C.) sus artesanos utilizaban ya la rueda de alfarero para hacer delicada alfarería que ornamentaban con brillante pintura negra hecha con una mezcla de hematites roja, un álcali, sal y potasio. En unas tumbas de Ur que datan aproximadamente de 3500 a. C. se han encontrado verdaderos tesoros de arte de la más fina mano de obra, en oro y plata y en cobre y concha.

Algunos de los invasores se quedaron en Mesopotamia, pero otros parece que pasaron a Egipto llevando consigo cierta influencia sumeria. También entonces se alcanzó un alto nivel de civilización, como lo demuestra la exacta determinación científica del año astronómico. Los egipcios habían determinado que su año civil era exactamente de 365 días: 12 meses de 30 días cada uno, más cinco días extras sagrados o "celestiales". Mas, como el año astronómico, tiempo justo de la revolución de la Tierra alrededor del Sol, tiene algo más de 365 días, un año no seguía exactamente el paso del siguiente, y los naturales acontecimientos anuales, como la crecida del Nilo, avanzaban constantemente por el calendario civil. Aquellas crecidas no ocurrían con suficiente regularidad para fijar exactamente la duración del año astronómico y los egipcios tuvieron que buscar un reloj más preciso.

Lo hallaron en la salida de las estrellas por el este. Cada estrella sale unos cinco minutos más pronto cada día respecto del anterior, de suerte que cada mañana pueden verse nuevas estrellas que en anteriores días se desvanecían en el resplandor

del Sol, que ya había salido. El primer día en que se hacía visible la estrella Sothis (nuestra Sirio) se encontró que coincidía muy aproximadamente con los comienzos de la crecida del Nilo, y formaba una especie de mojón que se repetía cada año astronómico. Este era un reloj astronómico de precisión que marcaba años astronómicos exactos. La observación demostró que la primera salida visible de Sothis se adelantaba al año civil en la proporción de un día cada cuatro años, de manera que el año astronómico, según se vio, consistía en 365 días y $^1/_4$, y que la primera salida visible de una estrella volvería a su sitio original en el calendario civil después de 1 461 años. A este periodo los egipcios lo llamaron el *Ciclo Sóthico*. Se sabe que en el año 139 d. C. comenzó un nuevo ciclo, por lo que es fácil calcular cuándo comenzaron los ciclos anteriores. Parece probable que los egipcios comenzaran su calendario con el ciclo que dio principio hacia el año 4240 a. C., de suerte que, incluso en aquella remota edad, obtuvieron un conocimiento seguro de la duración del año por medio de observación realmente científica.

Antes del comienzo de la primera dinastía (probablemente hacia 3400 a. C., pero posiblemente mucho antes), los artífices egipcios habían estado produciendo hábiles trabajos en cobre, oro, alabastro y marfil. Habían descubierto que podían producir un vidrio decorativo sometiendo al calor arena con potasa y sosa y un óxido metálico, y sabían que podían colorearlo de azul añadiendo a la mezcla una sal de cobre.

Estaban ya empleando materiales para escribir: plumas, tinta y papel, y se servían de un alfabeto y un definido sistema de numeración (pp. 19 y ss.). Con aquéllos tomaban nota de los sucesos corrientes, incluyendo medidas de la altura alcanzada por el Nilo en sus crecidas sucesivas. Pero posiblemente la más asombrosa manifestación de su cultura sea la Gran Pirámide de Gizeh, construida probablemente el año 2900 a. C. Su base es un

cuadrado perfecto, cuyos lados van tan exactamente de norte a sur y de este a oeste que incluso marcarlos en las arenas del desierto no es, en ningún modo, pequeña hazaña. Y todavía es más notable la estructura que sustenta esta base. Son sus caras perfectamente planas (o lo eran antes de que se hubiera quitado su recubrimiento), y todas tienen exactamente la misma inclinación de 51° 50′. Sus hiladas de piedra están formadas por bloques de $2\frac{1}{2}$ toneladas, unidos tan exactamente que es imposible introducir entre ellos la hoja de un cuchillo. La cámara del rey, en el centro de la construcción, está techada con 56 bloques de piedra de 54 toneladas cada uno, cuya colocación ha tenido que exigir habilidad geométrica y de ingeniería de primer orden.

Más lejos, hacia Oriente, están la India y la China, las cuales tuvieron seguramente civilizaciones muy desarrolladas 3 000 años a. C. y posiblemente también muy desarrolladas ciencias. Los chinos registraron la aparición de cometas desde el año 2296 a. C., y el *Shu Chang,* colección de documentos del mismo periodo, habla del emperador Yao ordenando que se tomara nota de los días más largos y los más cortos, y de los equinoccios, cuando los días y las noches eran iguales en duración. Pueden los chinos haber conocido en aquella época la manera de predecir los eclipses, porque hemos leído que dos astrónomos fueron condenados a muerte por haber dejado de hacer tal predicción. "El músico ciego tocó el tambor, los mandarines montaron a caballo, el pueblo se reunió como manada. En aquel momento, Hi y Ho, como figuras de madera, nada vieron, nada oyeron y por su descuido en calcular y observar los movimientos de las estrellas han incurrido en pena de muerte."

Esto sugiere que la astronomía debió de haber alcanzado un gran adelanto en la China, y puede haber ocurrido lo mismo en la India; no lo sabemos. Por fortuna, esta cuestión no es de gran importancia para nuestra presente investigación, a la que inte-

resa menos la siembra de la simiente que el fruto del árbol. Nuestro estudio principal no será el origen de la ciencia física, sino su progreso, y éste no encontró camino franco hasta el siglo VI a. C. Entonces surgió la Grecia jónica, en la abrupta franja costera y las islas que forman el límite occidental de Asia Menor, y desde allí se extendió gradualmente, primero a la Grecia continental y después al resto de Europa.

Grecia era entonces una civilización nueva. A oriente se extendían las maduras civilizaciones de la China, la India, Persia, Mesopotamia, Fenicia, Creta y Egipto; a occidente las tierras todavía vírgenes de toda civilización, las salvajes y bárbaras tierras del Sol poniente. La ciencia, como el resto de la civilización, amanecía viniendo a estas tierras desde el Oriente. Ideas y conocimientos empezaron a fluir desde las viejas civilizaciones de Oriente hacia las nuevas civilizaciones que estaban apareciendo en Occidente, corriente ayudada por el comercio y circunstancialmente transmitida por la colonización o la conquista militar. La India y la China contribuyeron a la ciencia occidental sólo por medio de intermediarios del Cercano Oriente, de suerte que no estaremos muy equivocados si no nos preocupamos de estas remotísimas civilizaciones orientales, y limitamos nuestra atención a las más cercanas que produjeron influencia directa en Europa. Las primeras entre ellas fueron Mesopotamia (o Babilonia, como debemos designarla por ahora), Egipto y Fenicia; examinemos las aportaciones que estas civilizaciones fueron capaces de hacer hacia el siglo VI a. C.

Babilonia

Una de las más grandes hazañas científicas de los babilonios fue su sistema de numeración y método de calcular. Como la mayor parte de los pueblos primitivos, usó al principio un sistema decimal sencillo; esto es, contaban por decenas, probable-

mente, como pensaba Aristóteles,[3] porque el hombre tiene 10 dedos en las manos.

Mas, como varios pueblos habían comprobado, un sistema decimal no es idealmente conveniente. Se ha hecho notar con frecuencia que la aritmética hubiera sido mucho más sencilla si los hombres hubieran poseído 12 dedos en vez de 10. Entonces, probablemente, habríamos contado por docenas y usado el sistema duodecimal. Como 12 es divisible exactamente entre 2, 3, 4 y 6, se tiene la ventaja en que no aparecen con tanta frecuencia fracciones como $33^1/_3$% y 6.25 que aparecen en el sistema decimal porque 10 no es divisible entre 3 ni entre 4. Y, sin embargo, un sistema duodecimal no es perfecto, puesto que 12 no es divisible entre 5. Los últimos babilonios intentaron combinar las ventajas de ambos sistemas mediante un sistema sexagesimal, en el cual cada unidad de orden superior contiene 60 unidades del inferior inmediato; y 60 puede dividirse exactamente nada menos que por 10 factores: 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20 y 30. Estos babilonios emplearon este sistema en tablas de fecha tan remota como hacia el año 2000 a. C. Ha resultado tan conveniente en la práctica que todavía sobrevive en los 60 minutos de la hora y los 60 segundos del minuto, como igualmente en las correspondientes subdivisiones de ángulos.

Los babilonios combinaban este sistema sexagesimal con un esquema de notación que era "posicional", en el sentido de que el valor de un símbolo dependía del lugar que ocupaba en un número, ventaja que faltaba de modo tan manifiesto como entorpecedor en los esquemas de numeración griego y romano muy posteriores. En nuestra notación moderna, 123 proviene de $(1 \times 10^2) + (2 \times 10) + 3$, denotando los números centenas, decenas o unidades, según su posición. De la misma manera, para los babilonios 𒁹𒈫𒐈 significaba $(1 \times 60^2) + (2 \times 60) + 3$.[4] Tenían una notación semejante para las fracciones. Exactamente igual

que nosotros escribimos 1.23 para indicar $1+\frac{2}{10}+\frac{3}{10^2}$, ellos escribían 𒁹 𒎙𒐖 𒐗 para indicar $1+\frac{2}{60}+\frac{3}{60^2}$. No pasaron directamente a Europa este sistema de notación; pero fue probablemente el origen del sistema decimal indo-arábigo que finalmente vino al mundo occidental por medio de los árabes (p. 127), y el empleado hoy en el mundo entero; no se sabe cuándo o cómo se hizo el cambio de las sesentenas a las decenas.

Algunas veces fueron los babilonios incluso más lejos en la misma dirección, dividiendo su legua en 180 cuerdas y la cuerda en 120 codos. También dividieron la circunferencia en 360 grados. Hay quien piensa que hicieron esto para tomar el ángulo del triángulo equilátero (60°) como su unidad fundamental y dividiendo aquél en las usuales 60 unidades del orden inmediato inferior. Otros piensan que han podido entrar en juego en la cuestión consideraciones astronómicas. Cuando los primitivos babilonios trataron, en un principio, de medir el número de días que tiene el año, encontraron que eran aproximadamente 360. Más de 2 000 años a. C. convinieron en llamarlo de 360 como una aproximación, dividieron su año en 12 meses de 30 días cada uno e insertaron meses extras de cuando en cuando por la necesidad de evitar que el calendario se apartara de las estaciones. En fecha posterior trazaron el zodiaco, senda por la cual el Sol, la Luna y las estrellas parecen viajar a través del firmamento, y lo seccionaron en 12 divisiones iguales, de manera que el Sol recorriera una cada mes. Era natural entonces dividir cada una de estas divisiones en 30 partes, una de las cuales recorrería el Sol en un día, y la circunferencia completa quedaba entonces dividida en 360 unidades iguales.

Hay pruebas de que los babilonios no sólo enumeraban las 12 divisiones del zodiaco, sino que también dividían el firmamento norte en *constelaciones* o grupos de estrellas y dieron a éstas los nombres que conocemos. No viajaron por el hemisfe-

rio sur y, por tanto, no pudieron ver jamás las estrellas que rodean el polo sur del firmamento; en éste las constelaciones tienen nombres modernos, como el Cuadrante y el Telescopio. Pero las constelaciones del firmamento septentrional llevan los nombres de figuras legendarias y de héroes de la Antigüedad, lo que nos dice que las agrupaciones se hicieron y se les puso nombre en aquel tiempo remoto.

Cuando la Tierra gira tiene a la par un movimiento de balanceo (p. 112), de suerte que la posición del firmamento que puede verse desde cualquier parte de su superficie cambia constantemente; esta parte en la cual las constelaciones llevan nombres antiguos podía verse desde próximamente la latitud de 40° N., hacia el año de 2750 a. C., y esto hace suponer que estas constelaciones fueron agrupadas y denominadas en aquel tiempo por los babilonios. Eran prácticamente idénticas a las constelaciones de hoy del firmamento norte. La agrupación y nombre de las constelaciones chinas son diferentes, lo que demuestra que nuestras constelaciones no nos vinieron de la China.

Los astrónomos primitivos no supieron cómo medir con precisión las pequeñas fracciones del día: ninguno lo hizo hasta que Galileo descubrió el principio del péndulo al comienzo del siglo XVIII (p. 176). Sin embargo, 2 000 o 3 000 años antes de la era cristiana los sacerdotes de Babilonia registraban los movimientos planetarios con gran exactitud, especialmente los de Venus. Se dice que un templo poseía una biblioteca de tabletas de estas observaciones que databan de fecha anterior al año 3000 a. C., en tanto que una serie posterior que comenzó el año 747 a. C. resultó muy valiosa para las posteriores generaciones de astrónomos. Hacia el siglo VII a. C. los movimientos de los cuerpos celestes se registraban con regularidad por medio de un sistema completo de observaciones y se enviaban informes al rey, el cual parece que ejercía la inspección de las observaciones y del calendario.

Los astrónomos babilonios de tiempos más recientes sabían la astronomía suficiente para predecir los eclipses. El Sol se eclipsa siempre que la Luna pasa entre él y la Tierra, de modo que los tres astros queden en línea recta, así que si el Sol, la Luna y la Tierra se movieran todos ellos en un mismo plano habría un eclipse cada mes lunar. De hecho, los tres cuerpos se mueven en planos diferentes, con el resultado de que los eclipses no se repiten sino después de un periodo de 233 meses lunares, o lo que es igual, 18 años y 11 días y $^1/_3$. Este periodo es conocido como el *ciclo de saros* o más brevemente, el *saros*. Por medio del conocimiento del saros, ya en tiempos tan remotos como el siglo VI a. C., los babilonios sabían predecir eclipses.

Posteriormente hicieron algunas sorprendentes medidas exactas de otros periodos astronómicos. En particular se han conservado las siguientes estimaciones de la duración del mes lunar:[5]

Nabariannu (hacia 500 a. C.): 29.530614 días

Kidinnu (hacia 383 a. C.): 29.530594 días

Valor exacto: 29.530596 días

Un conocimiento preciso de esta clase llevaba consigo un poder concreto de prever y predecir el futuro astronómico, y esto indudablemente fue causa de la boga fenomenal de la astrología en Babilonia y del asombroso prestigio de que gozaron los astrólogos babilonios durante toda la Antigüedad. Porque si un estudioso del firmamento podía predecir los movimientos del Sol, de la Luna y de los planetas, y si (una creencia que la hermandad astrológica inculcaba cuidadosamente) los movimientos de aquellos cuerpos influían en los asuntos humanos, entonces es claro que el astrólogo podía salvar a sus clientes de influencias dañinas y mostrarles cómo volver a situaciones beneficiosas para su máximo beneficio.

La geometría también parece que tuvo un periodo de esplendor en Babilonia. Unas tabletas descifradas recientemente del año 1700 a. C., aproximadamente, demuestran que los babilonios de ese tiempo estaban familiarizados con el famoso teorema de Pitágoras (p. 40), que redescubrieron los griegos en el siglo V a. C., e incluso supieron cómo encontrar series de números enteros (por ejemplo 3, 4 y 5) tales que los triángulos que tuvieran lados de aquellas longitudes habrían de ser rectángulos. Los griegos fueron grandes geómetras, pero en este único caso particular, por lo menos, los babilonios estuvieron un buen millar de años más adelantados que ellos.[6]

Otras tabletas del mismo periodo demuestran que los babilonios eran entonces hábiles en cálculos aritméticos. Dichas tabletas contienen cierto número de tablas para la solución de problemas que conducen a ecuaciones de segundo grado, como la determinación de dos números cuya suma y producto son conocidos. Hay también tablas de la potencia a que debe elevarse un número dado para dar otro número también dado, habiendo sido, al parecer, empleados para el cálculo del interés compuesto, por cierto que acompañan por vía de ejemplo dos cálculos en los cuales el tipo de interés es de ¡20 y de $33\frac{1}{3}$%!

Egipto

Egipto y Babilonia estuvieron desde tiempos remotos en tan estrecho contacto comercial y cultural, que inevitablemente tenían mucho en común. Los egipcios, como los babilonios, tenían una buena notación decimal para números enteros,[7] pero fracasaron con las fracciones. Las expresaban, en lo cual los siguieron los griegos, por lo menos hasta el siglo VI d. C., como una suma de partes alícuotas (con la única excepción de $\frac{2}{3}$); esto es, de fracciones que tenían cada una de ellas por numerador la unidad. Por ejemplo, concebían $\frac{3}{4}$ sólo como $\frac{1}{2} + \frac{1}{4}$.

Nuestro conocimiento de sus métodos aritméticos viene en su mayor parte de un papiro que pertenece a la colección Rhind del Museo Británico. Está fechado hacia el año 1650 a. C., pero es sólo una copia hecha por un sacerdote llamado Ahmés, de un papiro más antiguo que parecería, por suposición subjetiva, escrito muchos siglos antes. Registra la resolución de gran número de fracciones en una suma de partes alícuotas, en las que siempre el numerador original es el número 2, por ejemplo:

$$\frac{2}{97} = \frac{1}{56} + \frac{1}{679} + \frac{1}{776}$$

Pero no se da regla ninguna para llevar a cabo tales soluciones, y el tratado entero parece ser un mero compendio de resultados obtenidos por repetidos ensayos. Nos da la impresión de una raza lenta, no imaginativa.

Los egipcios multiplicaban por un método que se dice fue empleado en Rusia hasta en fechas muy recientes. El *multiplicando* (el número que hay que multiplicar) se duplica; después se reduplica, y así sucesivamente hasta proporcionar una tabla que da 2, 4, 8, 16… veces el multiplicando. De esa tabla toman los productos que necesitan para dar el resultado requerido, efectuando la suma de ellos. Por ejemplo, para multiplicar por 13, el aritmético egipcio sumaría los productos por 1, 4 y 8 veces el multiplicando.

Tenían un procedimiento sencillo para hallar qué productos necesitaban. Supongamos que deseamos multiplicar 117 por 13. Escribimos primero 13 y 117 en la misma línea. En seguida dividimos 13 entre 2, despreciamos la unidad del residuo, lo mismo aquí que en cualquier otro caso, y escribimos el cociente 6 bajo el 13. Al mismo tiempo multiplicamos 117 por 2 y escribimos el producto 234 debajo del 117, y así completamos la segunda línea. Repetimos este proceso para obtener una tercera línea y continuamos hasta que la primera anotación es el nú-

mero 1. Ahora tachamos todas las líneas en las cuales es par el número de la primera columna (en este caso sólo la segunda línea) y sumamos todo lo que queda en la segunda columna como está hecho aquí.[8] La suma 1 521 es el producto que necesitamos. Este método reducía toda multiplicación de números enteros a una serie de multiplicaciones por 2; las fracciones podían multiplicarse por 2 usando la tabla de resoluciones antes mencionada.

13	117
~~6~~	~~234~~
3	468
1	936
17	1 521

En astronomía general los egipcios estaban mucho más atrasados que los babilonios; no hacían sino anotar el aspecto del firmamento en varias ocasiones, y esto era por servicio religioso más que por estudio. Parece que allí no hubo ninguna curiosidad sobre por qué ocurrían en el firmamento las cosas tal como se manifiestan; únicamente registraban los acontecimientos, desprovistos por completo de imaginación.

Por otra parte, la geometría egipcia estaba probablemente muy adelantada respecto de la de Babilonia, lo que no es para sorprender. La inundación anual de la tierra por las aguas del Nilo significaba un retorno anual a la tarea, parecida a la de Sísifo, de delinear el plano de los campos, y esto dio especial importancia al estudio y a la práctica de la geometría. El papiro de Rhind contiene cierto número de reglas para medir, como igualmente alguna información geométrica de género más abstracto; pero las dificultades de lenguaje con frecuencia oscurecen el significado. No podemos, por ejemplo, decir si el área de un triángulo dice allí que es la mitad de la base multiplicada por

la altura, o la mitad de la base multiplicada por el lado. Lo primero es, naturalmente, correcto, lo segundo incorrecto; pero las dos son casi la misma cosa cuando el triángulo es muy alto y estrecho, como ocurre en el diagrama que hay en el papiro.

Un papiro descubierto más recientemente, el papiro de Moscú[9] de la XII dinastía (probablemente de fecha aproximada a 1800 a. C.), presenta un conocimiento mucho más extenso de la geometría abstracta. Por ejemplo, contiene una fórmula exacta del volumen de una pirámide truncada: esto es, la parte de una pirámide de la que se ha separado, por un plano paralelo a la base, la parte que contiene la cúspide, como si fuera una pirámide de piedra sin terminar. Contiene asimismo una fórmula del área de un hemisferio, la cual determina que el hemisferio tiene dos veces el área del círculo que forma su base. Esto es absolutamente exacto, aunque la fórmula, tal como se expresa, supone que el valor de π, que es la relación de la circunferencia de un círculo a su diámetro, es $^{256}/_{81}$, siendo éste el valor atribuido generalmente en Egipto en aquel tiempo.

Pero la verdadera grandeza de Egipto no estaba en sus matemáticas; se funda más bien en la medicina. Relieves que datan aproximadamente de 2 500 años a. C. describen una operación quirúrgica en marcha, en tanto que el papiro de Ebers, de 1600 a. C., aproximadamente, contiene un tratado completo sobre preparación de drogas y esencias terapéuticas; y otro, el papiro de Edwin Smith, es realmente un tratado científico de cirugía. La medicina y la cirugía fueron las únicas ciencias, aparte de la geometría y la ingeniería, en las cuales parece que sobresalieron los egipcios, y ni en Egipto ni en Babilonia había nada digno de llamarse ciencia física.

Fenicia

Estrabón nos cuenta que los fenicios prestaron especial atención a las ciencias de los números, navegación y astronomía. Podemos creer sin reparo en esta afirmación. Difícilmente hubieran podido llegar a ser la gran potencia comercial de la Antigüedad de no poseer considerable aptitud numérica, ni haber sido los más grandes navegantes de su tiempo a menos de haber estudiado la navegación y la astronomía. De esto se han conservado pocas pruebas; puede que algunos documentos hayan desaparecido incluso, por lo que sabemos, sin haber sido citados. Pero hemos leído que en el siglo VI a. C. Tales (p. 74) aconsejó a los griegos que adoptaran la práctica fenicia de hallar el norte por medio de la Osa Menor en lugar de hacerlo por medio de la Osa Mayor, como era costumbre entre ellos. Parece que no siguieron su consejo, porque cerca de seis siglos más tarde encontramos un poeta menor griego, Arate, que escribió: "Es por medio de la Hélice [esto es, la Osa Mayor] como los aqueos juzgan en el mar adónde dirigir la ruta de sus barcos, en tanto que los fenicios ponen su confianza en la otra [la Osa Menor] cuando cruzan los mares. Ahora bien, Hélice es brillante y fácil de notar, viéndose grande desde el comienzo del ocaso; la otra es más pequeña y, sin embargo, es mejor para los marinos, porque da la vuelta entera en un menor circuito [esto es, que está más próxima al polo norte], y por esto los hombres de Sidón enfilan su ruta más directamente".[10]

Es significativo que los dos más grandes hombres de ciencia de la Grecia primitiva, Tales y Pitágoras, hayan sido ambos reputados de provenir de origen fenicio, como lo fue también Euclides el geómetra y Zenón, el filósofo, aunque muchos dudan de la justeza de estas pretensiones.

Grecia

El estudio de la ciencia física es en definitiva una investigación en busca de ley y orden en los fenómenos, de suerte que no puede florecer sin las herramientas necesarias para descubrimiento y discusión de cualquier ley y orden que puedan existir. Las herramientas fundamentales que se necesitan en las ciencias físicas son la aritmética, la geometría y las técnicas para medidas de tiempo y espacio.

Ahora bien, estas herramientas parece que estuvieron disponibles en el Egipto primitivo y en Babilonia, y posiblemente también en Fenicia, en amplia escala, en relación con las necesidades de aquel tiempo.

Mas ningún uso seriamente científico se hizo de ellas hasta muchos siglos después, y cuando empezó a aparecer, por vez primera, un verdadero espíritu científico, no fue en Egipto ni en Babilonia, sino en una pequeña colonia griega en las costas del Mar Egeo. No hubo completa rotura con el pasado, pero plantas más delicadas parecían adquirir nueva capacidad de crecimiento, como si el nuevo suelo de la civilización griega proporcionara algún nuevo factor que había faltado en más viejas civilizaciones. Entonces ¿cuál era este nuevo factor? Acaso en parte la liberación de la sabiduría, pasando de los sacerdotes a los seglares, como escribe Farrington:[11]

> El saber organizado de Egipto y de Babilonia ha sido una tradición manejada de generación en generación por colegios de sacerdotes. Pero el movimiento científico que empezó en el siglo VI entre los griegos era enteramente un movimiento seglar. Fue la creación y la propiedad, no de sacerdotes que proclamaban que representaban a los dioses sino de individuos cuya única pretensión era que los escucharan los seglares en su apelación a la razón común de la humanidad.

Más generalmente, acaso fue ese especial género de curiosidad intelectual que impele a los hombres a tratar de comprender más que meramente a saber.

Los egipcios, como decía Platón, no tuvieron tanto amor a la sabiduría como los griegos; su pasión era más bien por las riquezas y la prosperidad material. Habían acumulado enorme

cantidad de hechos particulares y aislados, pero no tenían la menor idea de buscar la relación de un hecho a otro. La sabiduría era asunto de revelación, un don de los dioses, y no correspondía al hombre el tratar de descubrir lo que Thoth[12] (Hermes) había dejado en silencio. Y de esta manera leemos que los sacerdotes, examinando las estrellas, estaban noche tras noche en lo alto de sus pilonos anotando las posiciones de los planetas; pero no sabemos nada de algún intento de descubrir las leyes que regían sus movimientos.

A los babilonios les afectó su éxito astrológico, lo cual los impulsó a perfeccionar las artes muy lucrativas de predecir el futuro astronómico; pero también sabemos poco de sus intentos de aumentar su conocimiento por pura curiosidad intelectual o de utilizar el conocimiento que poseían para cualquier propósito, excepto la ganancia astrológica. El conocimiento se había ido acumulando en Egipto y en Babilonia, y acaso también en Fenicia, pero la investigación de ese conocimiento por sí mismo no apareció apenas hasta que vinieron los griegos.

¿Quiénes, pues, eran aquellos griegos que mostraban estas nuevas capacidades e intereses, y de esa manera pudieron fundir en una ciencia el tosco material y los hechos desconectados? ¿De dónde vinieron y cuándo empezaron a manejar sus poderes intelectuales?

No lo sabemos; es éste uno de los grandes misterios de la historia aún no resueltos. Las grandes civilizaciones de la Antigüedad (la india, la china, la persa, la egipcia, la civilización minoica en Creta, y la babilónica y la mesopotámica), todas habían sido establecidas millares de años antes de que los griegos aparecieran, y cada una de ellas tuvo sus propias características distintivas y bien señaladas. La nueva civilización griega no llevaba el sello de ninguna de aquéllas. Se trataba de algo más fresco y más joven, y, en verdad, fue diferente. La primera clara descripción que tenemos de ella está en los poemas de Homero,

los cuales, según se cree, asumieron su forma presente en el siglo IX a. C., pero es lo más probable que describa la civilización griega de dos siglos anteriores, aproximadamente. Nos hablan aquellos poemas de una raza ardiente y gozosa, viviendo con sus cuerpos más que con sus espíritus, y sin que los perturbaran las dudas acerca del mundo en que se encontraban; era su ideal tomar a manos llenas el fuego de la vida y disfrutarlo plenamente mientras durara. Aparte de la mención de ciertas estrellas por el nombre, los poemas no muestran familiaridad alguna con ciencia física en ningún género, y no hay nada en ellos que suponga los poderes del pensamiento abstracto y la curiosidad intelectual que habían de llegar a tan espléndida floración algunos siglos después.

No obstante, en el aspecto artístico han advertido muchos una semejanza entre la nueva civilización griega y la más vieja civilización minoica cuyo centro era Cnosos de Creta hacia los años 3500 a 1500 a. C.; encuentran la misma concepción de la belleza y el mismo sentido de la forma en ambas, la misma exquisita labor de artesanía y el mismo cuidado por los detalles. Los eruditos son incapaces de leer la escritura minoica, y algunos piensan que la civilización griega hubo de tomar mucho de la civilización minoica que la antecedió. La posición de Cnosos hizo de ella un centro natural de comercio, y muy bien pudo haber recibido ideas, lo mismo que recibía mercaderías del Oriente, y traspasarlas a Occidente.

Incluso así, esto no nos dice nada acerca de dónde eran originarios los griegos. Muchos doctos en esta materia han imaginado guerreros invasores (los aqueos de Homero) entrando en Grecia hacia 1400 a. C., armados posiblemente con armas de hierro, que vencieron rápidamente a las primitivas armas de los nativos, los pelasgos. Algunos creen que vinieron del Asia occidental o de las estepas rusas; otros piensan que vinieron de la cuenca del Danubio o del norte de Europa. Hay quien cree que

el principal torrente de invasores se quedó en la Grecia continental en tanto que otras corrientes subsidiarias siguieron adelante y colonizaron las islas y costas del Mar Egeo (faja de tierra occidental del Asia Menor), donde establecieron las colonias de Jonia al norte y de Doria al sur. Con ellos trajeron sus dioses de tribu, Zeus, dios del firmamento y de las lluvias, que habita en las montañas y arroja rayos, juntamente con su cortejo de hijos e hijas, Apolo, Atenea y los demás. Pronto éstos fueron aceptados por los griegos como sus dioses oficiales, pero hubieron de compartir su soberanía con otros dioses que ya estaban admitidos en Grecia y venían en sucesión directa de los dioses de la fertilidad de todavía más primitivas tribus.[13]

En todo caso parece una suposición cierta que los griegos eran una raza mezclada, y su civilización era una fusión de ingredientes de diversos orígenes. La historia proporciona muchos ejemplos de la formación de una civilización nueva, procedente de una mezcla de conquistadores invasores con una raza nativa más primitiva; como cuando el estaño se mezcla con el cobre, lo que resulta es mejor que cualquiera de los ingredientes. Y esto puede haber ocurrido con Grecia.

Casi de un modo repentino nos encontramos con el genuino intelecto griego y con él hallamos un grupo de hombres de ciencia, los primeros que podemos admitir como tales. Era en el siglo VI a. C. cuando, como decía Herodoto: "la raza griega se señalaba como distinta de los bárbaros, más inteligente y más emancipada de la insensata necedad". La residencia era Jonia, y más especialmente Mileto, la mayor ciudad de Jonia y quizás de toda Grecia, aunque su población escasamente pasó de 10 000 habitantes. Fue un centro comercial, que traficaba especialmente con Egipto, y como había fundado más de 60 ciudades-hijas en las costas del Mediterráneo, debió de gozar de constante intercambio de ideas con otros países mediterráneos. La alfarería que se ha hallado en excavaciones demuestra que exis-

tía en los tiempos minoicos; hacia la mitad del siglo VI a. C. llegó a ser preeminentemente el centro de la cultura griega, una especie de punto focal a través del cual todos los rayos de luz intelectual tenían que pasar, probablemente, en su marcha de Oriente a Occidente.

II
JONIA Y GRECIA PRIMITIVA
(600-320 a. C.)

En el presente capítulo examinamos los primeros tres siglos del progreso científico griego; empieza nuestro periodo con el impacto más remoto de las ideas científicas orientales sobre la Grecia jónica, y termina con la conquista de Grecia por Alejandro Magno (332 a. C.), la muerte de Aristóteles (322 a. C.), una general decadencia de la ciencia y el arte en Grecia, y la fundación de la ciudad de Alejandría y de su universidad (323 a. C.), que fue el centro intelectual del mundo durante muchas generaciones posteriores. Hablando brevemente, estudiamos la ciencia griega en el periodo de la grandeza intelectual de Grecia.

Aquella ciencia era casi enteramente matemática. Los griegos no tenían nada de nuestro complicado equipo de laboratorios y observatorios. En verdad, su equipo se limitaba a sus propios cerebros; pero éstos eran de primer orden; exactamente igual que Esquilo y Sófocles mostraron talentos comparables con los de Shakespeare, así Arquímedes y Aristarco los mostraron análogos a los de Newton. De esta manera pudieron enfrentarse con sus varios problemas sólo por medio de la reflexión y la contemplación, ayudadas en el mejor caso por un mínimo de observación y, cuando la física y la astronomía avanzan deslizándose con mucha dificultad, lo hacen en forma de especulación filosófica más que de verdadera ciencia tal como la entendemos hoy.

Matemáticas griegas

TALES. El primero y el que se anticipó a los demás matemáticos griegos es Tales, que nació en Mileto hacia el año 624 a. C., y vivió hasta el 546 a. C., aproximadamente. Dice Herodoto que era de origen fenicio; pero otras versiones dicen que provenía de una noble familia milesia.

Su intelecto era gigante, y, como en muchas de las grandes figuras de la ciencia, sus talentos eran tan variados como múltiples. "Hombre de Estado, ingeniero, hombre de negocios, filósofo, matemático y astrónomo, abarcó casi el campo entero del pensamiento y la actividad humana."[1] Como muchos pensadores, conquistó una reputación por vivir en un mundo suyo propio; cuenta Platón de él que, habiéndose caído a un pozo cuando estaba mirando las estrellas, y "llegando junto a él una culta y bella sirviente de Tracia", le dijo que se apasionaba tanto por saber qué es lo que pasaba en el firmamento, que no se enteraba de lo que estaba ocurriendo a sus mismos pies. A pesar de este azar, parece que fue especialmente sagaz en los asuntos prácticos. Refiere Aristóteles que un año en que la cosecha de aceitunas prometía ser particularmente abundante, Tales compró cuantas pudo y las acaparó en los molinos, y después amasó una fortuna vendiéndolas a su precio normal. Está fuera de duda que fue ingeniero de alguna capacidad, por lo que se le encargó hacer pasar el ejército de Creso a través del río Halis a pie seco. Hizo esto construyendo un lecho artificial del río a un lado del cauce natural, para desviar las aguas; después que el ejército había atravesado el antiguo y seco lecho del río, volvió las aguas a su curso propio. También sabemos que intervino más de una vez eficazmente en la política.

Como en muy gran parte por medio de sus actividades entró por primera vez en Grecia el espíritu científico, quisiéramos saber especialmente dónde y cómo adquirió su interés por la ciencia; pero nos falta esta información. Pudo haber sido algu-

na influencia babilónica; porque tenemos noticia de un sacerdote babilonio que estableció una escuela en la inmediata isla de Cos, y se ha supuesto que Tales pudo haber sido uno de sus discípulos. Por otra parte, sabemos que Tales viajó mucho, en particular por Egipto y Babilonia; y, por último, se nos ha dicho[2] que no tuvo nunca ningún maestro, excepto cuando se asoció con los sacerdotes en Egipto.

Aunque esto pudo ser, un hombre de tan amplios y variados intereses podía asimilar con facilidad cualquier idea científica que encontrara en sus viajes; bastante pocas había en aquellos tiempos. Probablemente pudo haber adquirido algún conocimiento geométrico en Egipto, y aprendido en Babilonia el ciclo de saros y el método babilónico de predecir los eclipses. Refiere Herodoto que cuando Tales regresó a su hogar conquistó una gran reputación en Mileto por la predicción de un eclipse de Sol.[3] Ocurrió durante una batalla entre los medos y los lidios, y fue la oscuridad tan completa que el combate tuvo que suspenderse. Se pensó que aquello era para mostrar que los dioses querían que terminara la guerra, y se concertó la paz. De esta suerte, no solamente el eclipse, sino la profecía fue también destacada de manera prominente, y en el año 582 a. C. Tales fue declarado uno de los Siete Sabios de Grecia (el único filósofo entre una multitud de políticos); Plutarco, que escribió hacia el año 100 d. C., dice que Tales era el único de los siete "cuya sabiduría se apoyaba en la especulación que sobrepasa los límites de la utilidad práctica".

Ninguno de sus escritos ha sobrevivido; los conocemos únicamente de tercera mano. Justamente unos 1 000 años después de su muerte, el filósofo ateniense Proclo (p. 50) escribió un *Comentario sobre Euclides* que comenzaba con un breve resumen de las matemáticas griegas hasta el tiempo de Euclides.[4] En éste se nos dice que Tales fue a Egipto, y desde allí introdujo el estudio de la geometría en Grecia, y que estaba interesado en ella,

no sólo por sus aplicaciones prácticas, sino también "como abstracta ciencia deductiva basada en proposiciones generales". También lo acredita con el conocimiento de las cuatro siguientes proposiciones:

1) Todo diámetro de un círculo lo divide en partes iguales.

2) Los ángulos en la base de un triángulo isósceles son semejantes (fig. II.1.)[5]

3) Cuando dos líneas rectas se cruzan los ángulos opuestos son semejantes (fig. II.2.)[6]

4) Si se nos da la base de un triángulo y los ángulos de sus extremos, el triángulo está determinado.

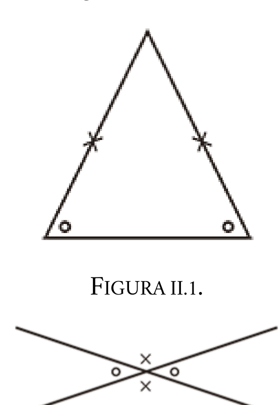


FIGURA II.1.

FIGURA II.2.

Plutarco atribuye a Tales, al menos por deducción, el más avanzado conocimiento de que, cuando dos triángulos tienen la misma forma (esto es, cuando tienen sus ángulos iguales), sus lados son proporcionales. Porque dice aquél que Tales medía la altura de una pirámide comparando la longitud de su sombra con la de un palo de longitud conocida. Si, por ejemplo, se hallaba que un palo de tres pies arrojaba una sombra de seis pies, entonces, una sombra de 600 pies sería producida por una pirámide de 300 pies de altura. Plutarco añade que este método

de medida impresionó grandemente al rey egipcio Amasis, que estaba presente. Pero, anteriores escritores, Jerónimo y Plinio, dicen que Tales eligió el momento preciso en que la sombra era igual a la altura del objeto que daba esa sombra. Si esto fue todo, Tales pudo no haber estado familiarizado con la proposición más general, ni con la idea algo difícil de proporcionalidad. Por otra parte, Proclo dice que Tales era capaz de determinar las distancias de los navíos en el mar, y que su método implicaba el teorema de proporcionalidad; los detalles de ese método no son conocidos.

También se atribuye a Tales otra proposición que él debió de tener por importante, porque decía que había sacrificado un buey a los dioses inmortales para celebrar su descubrimiento. Panfila, que escribe durante los años de Nerón (54-68 d. C.) o hacia aquel tiempo, lo anota en la forma siguiente: "Tales fue el primero que inscribió un triángulo rectángulo en un semicírculo, lo que parece significar que fue el primero en descubrir que el ángulo inscrito en un semicírculo (tal como el ángulo *ADB* en la fig. II.3.) es un ángulo recto".

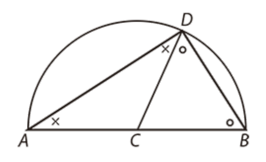


FIGURA II.3.

Todas estas proposiciones tratan con líneas, en contraste con la geometría egipcia, que trata solamente con superficies, áreas y volúmenes; podemos decir que Tales fue el creador de la geometría de líneas. Además, las proposiciones de Tales anunciaban verdades abstractas universales, en contraste con las proposiciones de los egipcios, que se referían a medidas prácticas; Tales estableció la geometría abstracta como ciencia.

No sabemos de qué manera Tales consiguió sus varios resultados. En tanto que la geometría procede por métodos pura-

mente deductivos, nada puede provenir de ella que no haya sido previamente planteado en forma de hipótesis. Sería interesante saber exactamente de qué hipótesis partió Tales para llegar a sus proposiciones. Algunas son, naturalmente, tan sencillas que la pregunta ni siquiera se plantea, por ejemplo, nosotros podemos *ver* que un diámetro biseca a un círculo tan pronto como doblemos a éste sobre sí mismo por el diámetro como una bisagra. Pero la proposición sobre el ángulo inscrito en un semicírculo es menos evidente. Es fácil demostrarla por deducción si se sabe que la suma de los tres ángulos de un triángulo es igual a dos ángulos rectos; pero de otra manera, no. Y es muy poco probable que Tales supiera esto; no imaginó el ángulo como una magnitud, de suerte que la idea de sumar ángulos era extraña a su pensamiento; además, Proclo atribuye concretamente el teorema a los pitagóricos, que vinieron unos 50 años después de Tales (p. 37). Por otra parte, Tales pudo muy bien haber sabido, como materia de hecho, que las dos diagonales de un cuadrilátero rectángulo son iguales y se cortan en partes iguales; éste es el género de relación que salta a la vista observando un pavimento embaldosado, aparte de que es evidente por la consideración de que no hay razón alguna para que una semidiagonal sea más larga que otra (fig. II.4.). Si Tales hubiera notado esto alguna vez, habría visto en seguida que puede circunscribirse un círculo a los cuatro vértices de cualquier rectángulo y el teorema quedaría demostrado.

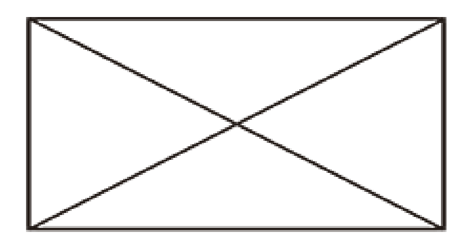


FIGURA II.4.

Muchas de las demostraciones de Tales debieron de ser de este género semi intuitivo; nos dice Proclo que Tales "descubrió muchas proposiciones [...] siendo su método de abordarlas en algunos casos más abstracto y en otros más observacional (αἰσθητικώτερον)".

La mayor parte de sus "descubrimientos" eran tan rudimentarios que cualquier chico de la escuela de hoy los menospreciaría como evidentes. Mas Tales estaba en la misma fuente de la geometría europea desde donde él cambió la corriente de descubrimientos en verdaderos canales científicos, de suerte que, seguir las huellas de la historia de la geometría, y por esto mismo de las matemáticas y de la ciencia en general, es simplemente determinar el curso de aquella corriente. Las más grandes hazañas de la ciencia física (la corriente eléctrica, el telégrafo y el teléfono, el aeroplano y el coche de motor, la radio y la televisión) son todas de origen occidental, y si retrocedemos y las seguimos hasta su definitivo origen, encontramos que todas ellas siguen hacia atrás las huellas de la corriente de sabiduría comenzada por Tales de Mileto.

Anaximandro. Tales halló un verdadero sucesor en su compatriota y amigo Anaximandro, quien nació hacia el año 611 a. C., y vivió hasta 547 a. C., aproximadamente. Nos dice Suidas que Anaximandro escribió un libro de geometría, de suerte que parece que continuó la tradición geométrica de Tales; pero parece ser que le interesaron más la astronomía, la geografía y los problemas generales de filosofía. Aparte de su geometría, se dice que escribió solamente un libro, *Sobre la naturaleza,* que se publicó poco después de su muerte. Teofrasto[7] da una noticia de éste y de sus doctrinas que lleva a la impresión de su gran talento y de la amplia variedad de cosas por las que se interesó. Algunas veces parece como si hubiera nacido 2 000 años anticipado a su tiempo, pues es cierto que se acercó más que ninguno

de sus contemporáneos al punto de vista de la ciencia de nuestros días.

En particular, introdujo la idea de la evolución en la ciencia. Hipólito[8] nos dice que Anaximandro distinguía "las tres etapas de venir a ser, existir y fallecer". Atribuía todo cambio al movimiento, y sostenía que hay infinito número de mundos, todos en movimiento, "puesto que sin movimiento no se puede venir a ser ni fallecer". También introdujo las ideas evolucionistas en biología, diciendo que los seres vivos se originaron primeramente en el légamo que fue evaporado por el Sol; tenían al principio caparazones espinosos, pero seguidamente se desplazaron a lugares más secos. El hombre, pensaba, nació de un pez, y al principio era igual a un pez. Es diferente de todos los demás animales, los cuales encuentran alimento para ellos poco después de nacer, porque el hombre necesita larga crianza; si el hombre hubiera sido originariamente como es ahora, no podía haber sobrevivido.

Aparte de todo esto, fue el primer geógrafo que intentó hacer un mapa completo de las partes habitadas de la superficie terrestre. Demostró asimismo cómo podía medirse el tiempo por medio de una especie de reloj de sol primitivo en el cual se producía la sombra de un palo vertical; pero ya los babilonios habían empleado este artificio antes que él.

Después de su muerte la escuela milesia transfirió gradualmente su interés a la filosofía y, por último, llegó a su fin hacia el año 400 a. C. No tenemos por qué ocuparnos más de ella; si deseamos observar el desarrollo de la ciencia hemos de abandonar a Mileto y ocuparnos en uno de sus más distinguidos ciudadanos que llevaron la antorcha del estudio geométrico aún más lejos hacia el Occidente. Debemos conceder nuestra atención a la misteriosa y mística figura de Pitágoras y a la escuela que fundó.

Pitágoras. Sabemos poco de su vida, nacimiento y muerte. El lugar de su nacimiento fue Samos, en Jonia, y, al igual que Tales y Euclides, se ha dicho que fue de origen fenicio; pero esta declaración es sospechosa. La única fecha segura en su vida es el año 530 a. C., cuando dejó Samos para fundar una escuela en Crotona, colonia dórica en el sur de Italia. En esa fecha era todavía bastante joven como para que viviera su madre (porque se la llevó con él), y bastante viejo como para abandonar el lugar de su nacimiento por causas políticas, por lo que en general se piensa que pudo nacer hacia el año 570 a. C. Dice Yámblico[9] que a Tales le impresionó tanto la capacidad de Pitágoras, al cual le comunicó el cúmulo de su propio saber, que le aconsejó que fuera a estudiar con los sacerdotes egipcios. Así lo hizo, estudiando astronomía y geometría desde la edad de 22 años a la de 44, después de lo cual vivió en cautividad durante 12 años en Babilonia y "alcanzó la más elevada altura en aritmética, música y otras ramas de la sabiduría". Pero es difícil meter todo esto en una biografía digna de fe.

En Crotona fundó una especie de fraternidad de hombres ilustrados, cuyos miembros tenían todas las cosas en común: conocimiento, filosofía y bienes materiales; ordenaban sus vidas según un código moral común y formaban una corporación parecida a una moderna orden religiosa. Sus miembros predicaban y practicaban el estricto dominio de sí mismos, la templanza y la pureza, viviendo vida sencilla y ascética y privándose de todo alimento animal, porque creían que los animales eran parientes del hombre: uno de los pocos ejemplos de consideración para el reino animal que hallamos antes de la era moderna; Pitágoras está señalado, en unión de Empédocles, como fundador de esta rama de la moralidad.[10] En pocas palabras, los pitagóricos esperaban por medio de la abstinencia, disciplina y ceremonias religiosas, purificar el alma, liberarla de la cadena

de nacimientos y prepararla para la vida después de la muerte. Porque ellos consideraban el cuerpo meramente como prisión temporal del alma, defendiendo Pitágoras mismo las doctrinas de la inmortalidad y la transmigración del alma. Ambas cosas las aprendió de su maestro Ferécides de Siros. Pitágoras escribió lo siguiente: “Cuando vivimos, nuestras almas están muertas y enterradas en nosotros; pero cuando morimos, nuestras almas renacen y viven”.

En asuntos prácticos, los pitagóricos tendían a una reforma moral de la sociedad, y esto los condujo a su ruina. Su defensa del gobierno de los mejores, verdadera aristocracia en el más literal sentido de la palabra, los llevó a frecuentes conflictos con la plebe democrática, la cual, más tarde, en el año 501 a. C., o alrededor de esa fecha, asesinó a muchos de ellos e incendió sus hogares, en tanto que su fundador se fugó a Tarento. Las narraciones difieren respecto de cómo terminó el asunto; pero aquella sociedad parece que acabó su inquieta existencia en alguna parte hacia mediados del siglo IV a. C.

La ocupación diaria de aquella fraternidad era la adquisición de conocimiento y éste era compartido únicamente entre ellos; cualquiera que lo divulgara merecía morir. Hemos leído que dos pitagóricos fueron ahogados en el mar, y en uno y otro caso se dijo que estaba bien hecho; uno de ellos, llamado Hipaso, se había jactado de que había descubierto un nuevo sólido regular: el dodecaedro (p. 46), en tanto que el otro había dado a conocer la inconmensurabilidad de $\sqrt{2}$ (pp. 44 y 45).

Este hábito del secreto hace muy difícil decir cuánto consiguieron los pitagóricos en la ciencia, e imposible asignar los resultados a sus autores individuales. Nuestro más útil guía es una narración de la filosofía pitagórica y sus enseñanzas que el astrónomo Filolao (p. 151) escribió unos 90 años después de la muerte de Pitágoras. Nada del libro original ha sobrevivido, pero están descritas partes de él en el llamado *fragmento de Eu-*

demo (p. 31, n. 4). Se dice que Platón sacó de este libro materia para su único diálogo científico, el *Timeo.* Proclo escribe que Pitágoras "transformó el estudio de la geometría en educación liberal", en tanto que Aristoxeno señala que "hizo adelantar el estudio de la aritmética y la sacó de la región de la utilidad comercial".

La aritmética pitagórica se relacionaba mucho con las propiedades místicas de los números enteros. Todos sabemos cómo la superstición puede enlazar las ideas con los números; el 3 y el 7 pueden ser sagrados, el 13 infausto, 666 el número de la bestia, y así sucesivamente. Las ideas de los pitagóricos fueron anotadas por Aristóteles. Asociaban el número 1 con un punto, el 2 con una línea, el 3 con una superficie y el 4 con un espacio. Esto era bastante sencillo; pero el 2 también estaba asociado con la opinión, porque ambos son "ilimitados e indeterminados", y también con la femineidad por razones no especificadas. El 3 estaba no sólo asociado con la idea de superficie, sino también con la masculinidad. El 4 lo asociaron con la justicia, porque $4 = 2 \times 2$, y así es producto de dos factores igualmente equilibrados. El próximo número, el 5, está relacionado con el matrimonio, porque resulta de la unión del varón 3 y la hembra 2, y el 7 con la virginidad, porque no tiene factores. Hubo también 10 oposiciones fundamentales relacionadas con números impares y pares, como el finito y el infinito, el uno y los muchos, la derecha y la izquierda y así sucesivamente. Hoy parece increíblemente fútil; pero los pitagóricos pensaban que esto proporcionaba la clave del universo. Dice Aristóteles que éstos pensaban que los números no sólo expresaban la forma del universo, sino también su misma sustancia. De igual modo, más tarde, cuando para Platón el mundo era en primer lugar el espíritu y para Demócrito estaba compuesto de átomos, los pitagóricos pensaban que consistía en números. Para ellos las ma-

temáticas eran la realidad total, y no distinguían entre un sólido geométrico y un cuerpo físico que se moviera en el espacio.

Estudiaban también los números en situación geométrica, prestando atención especial a lo que describían como números triangulares y cuadrados. Los números triangulares eran 1, 3, 6, 10, 15, etc., porque cada uno de estos números de puntos llenarán exactamente el interior de un triángulo equilátero con puntos igualmente espaciados, como en la figura II.5.[11] Los números cuadrados eran semejantes, remplazando el triángulo por un cuadrado; eran, por consiguiente, 1, 4, 9, 16, 25, etc. Los pitagóricos descubrieron cierto número de trivialidades referentes a estos números, como, por ejemplo, que la suma de dos números triangulares consecutivos es un número cuadrado; esto se puede ver inmediatamente poniendo un triángulo junto al otro, como en la figura II.6.[12]

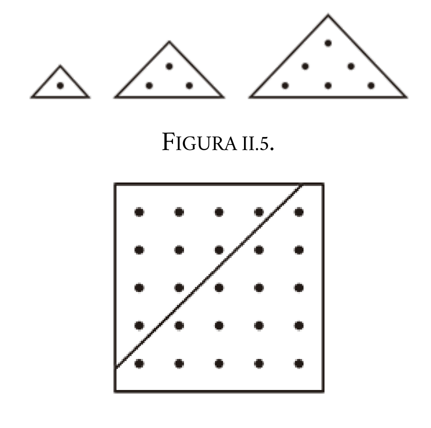


FIGURA II.5.

FIGURA II.6.

Por otra parte, hicieron descubrimientos de verdadera geometría, que fueron de importancia fundamental. El famoso teorema de Pitágoras se le atribuye corrientemente, y de manera general, al mismo Pitágoras: "Si un triángulo es rectángulo, el cuadrado construido sobre su lado mayor es igual en área a la suma de los cuadrados construidos sobre los otros lados". Mucho de lo que hicieron los pitagóricos evidentemente fue tonto,

inútil y engañoso; pero si realmente descubrieron este teorema, plantaron una verdadera piedra angular en la ciencia matemática, imperecedera e indispensable. Pitágoras pudo calificar éste como su más grande éxito, porque Apolodoro, poeta de fecha desconocida, escribe cómo "Pitágoras descubrió esa famosa proposición, por lo cual ofreció un espléndido sacrificio de bueyes". No obstante, tal hecho parece ser exactamente lo contrario de todo lo que sabemos respecto del carácter de Pitágoras, y la narración es tan sospechosa como lo es la que se ha dicho de Tales (p. 33), que parece posible que simplemente Apolodoro confundiera a los dos y le siguieran en su error autores posteriores. Aunque el sacrificio lo ofreciera Pitágoras, hay poca certeza en cuanto al descubrimiento particular que lo ocasionara. La mayor parte de las referencias dicen que se trataba del teorema antes descrito, pero hay uno, por lo menos, que dice que se trataba de un teorema diferente, en tanto que Vitruvio, uno de los primeros que escribieron sobre este asunto, dice que el sacrificio lo motivó el sencillo descubrimiento de que el triángulo particular de lados proporcionales a 3, 4 y 5 es triángulo rectángulo. Los pitagóricos pudieron muy bien haber descubierto esto mediante sus estudios sobre los números "cuadrados".[13]

Se ha dicho con frecuencia que este último resultado era conocido por los antiguos egipcios y que sus "agrimensores" lo empleaban para construir ángulos rectos; pero, al parecer, no hay prueba de esto.[14] Por otra parte, como ya hemos visto, el teorema general era conocido por los babilonios hacia el año 1700 a. C. En tabletas de esa fecha se razona cómo calcular el diámetro *AE* de un círculo (fig. II.7.) cuando la cuerda *BC* y la sagita *DA* son conocidas, siendo el resultado obtenido simplemente una expresión del teorema de Pitágoras ($OC^2 = OD^2 + DC^2$).

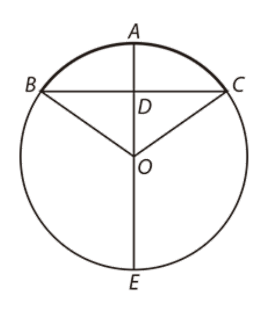


FIGURA II.7.

Un libro indio del siglo IV o V a. C. también presenta el teorema general, pero sin demostración alguna, y explica cómo pueden trazarse ángulos rectos construyendo triángulos cuyos lados están representados por los números 3, 4, 5; 5, 12, 13; 8, 15, 17, y 12, 35, 37.

Sin embargo, de lo mucho o poco que el teorema haya sido conocido antes del tiempo de los pitagóricos, sólo puede haber pequeñas dudas acerca de que fue redescubierto independientemente por ellos y, según la mayor parte de los autores europeos de los pocos siglos siguientes, por Pitágoras mismo. Y este redescubrimiento fue el que introdujo el teorema en la matemática moderna.

El lector que no tenga interés por las matemáticas puede preguntarse dónde está la importancia de este teorema; puede considerarlo cosa abstracta, pedante y sólo de interés académico. Pero examinemos una aplicación práctica de él. Colchester está situado a 30 millas al norte y 40 millas al este de Londres. ¿Cómo podremos deducir la distancia que hay de Colchester a Londres en línea recta? La contestación es: por el teorema de Pitágoras, y por nada más abreviado de las mediciones físicas actuales. El teorema nos dice que la distancia de Colchester a Londres es de 50 millas, porque $50^2 = 40^2 + 30^2$. De esta manera nos dice cuánto nos ahorramos viajando directamente en lugar de marchar siguiendo los lados de un triángulo. El teorema original era aplicable únicamente a triángulos rectángulos, pero

se extiende con facilidad a triángulos de cualquier forma. Considerado de esta manera, no podemos ya sorprendernos de que este teorema sea una piedra angular, acaso *la* piedra angular, de la geometría.

No sabemos cómo se comprobó el resultado. Hofmann ha coleccionado 30 demostraciones diferentes, y puede muy bien haber sido una de éstas. Acaso haya sido probablemente la más sencilla, que se desarrolla como sigue:

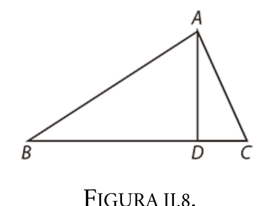


FIGURA II.8.

Bajamos una perpendicular *AD* desde el ángulo recto *A* del triángulo sobre el lado opuesto *BC* (fig. II.8). Entonces los tres triángulos *ABC, DBA* y *DCA* tienen todos la misma forma [semejantes], de suerte que sus lados tienen que ser proporcionales (p. 32). Por tanto, tenemos:

$$\frac{BC}{AB} = \frac{AB}{BD}, \text{ de donde } AB^2 = BC \times BD.$$

Operando de igual manera con el otro triángulo pequeño, hallaremos:

$$AC^2 = BC \times DC.$$

De suerte que la suma de los cuadrados de *AB* y *AC* es *BC* (*BD* + *DC*), la cual es igual al cuadrado de *BC* (el teorema de Pitágoras).

No hemos sacado todo el jugo a la figura II.8. porque los dos triángulos menores son semejantes entre sí, de suerte que $AD^2 = BD \times DC$. Tenemos aquí la solución de otro problema atribuido a Pitágoras: la construcción de un cuadrado que tenga igual área que un rectángulo dado. El "espléndido sacrificio de los bueyes" se relaciona a veces con este descubrimiento más que

con el principal problema pitagórico, pero están los dos tan íntimamente ligados que bien pudieron haber sido descubiertos al mismo tiempo.

Los griegos se interesaron mucho con problemas de este tipo. Tenían poca o ninguna aptitud para el álgebra, de suerte que incluso las más sencillas fórmulas algebraicas no significaban nada para aquéllos, a menos que pudieran trazar un diseño geométrico de su significación. Ellos sabían que las áreas de superficies y los volúmenes de sólidos eran importantes, pero no supieron cómo expresarlas, excepto en las áreas de cuadrados y en los volúmenes de cubos.

El sencillo problema citado hace un momento puede describirse como la cuadratura del rectángulo. Mucho más famoso problema fue la cuadratura del círculo, esto es, trazar un cuadrado cuya área sea igual a la de un círculo dado. Hace ya mucho tiempo que se sabe que este problema no puede resolverse por métodos puramente geométricos, por lo cual, "el intento de cuadrar un círculo" casi ha pasado a ser en lenguaje común un sinónimo de intentar un imposible. Pero esto no era conocido por los griegos y los pitagóricos tuvieron la fama comúnmente acreditada de haber resuelto este problema (véase p. 50).

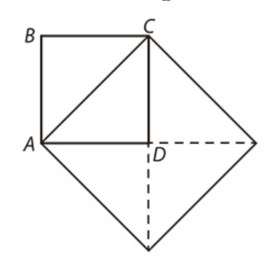


FIGURA II.9.

Sin embargo, demostraron que otro problema de tipo semejante era de solución imposible. En todo cuadrado *ABCD* (fig. II.9.), el cuadrado de la diagonal *AC* es igual al doble del cuadrado de cada uno de los lados *AB, BC.* Esto puede verse por el teorema de Pitágoras o completando el cuadrado sobre *AC* co-

mo en la figura II.9. (otro modelo que se puede encontrar en un pavimento embaldosado). Expresamos esto diciendo que la diagonal de un cuadrado es igual al lado multiplicado por $\sqrt{2}$ y tenemos la satisfacción de saber que el valor de $\sqrt{2}$ es 1.4142…, decimal de infinitas cifras. Pero los pitagóricos estaban familiarizados con tales sutilezas. Sostenían siempre su idea de que una línea era una serie sucesiva de unidades muy pequeñas, todas iguales y tan diminutas como para ser poco más que puntos. Si el lado de un cuadrado contenía p unidades de éstas, y su diagonal contenía q, entonces el número que designamos por $\sqrt{2}$ tendría el valor q/p.

Es sumamente fácil demostrar que no puede existir ninguna fracción como ésta.[15]

Nosotros expresamos esto diciendo que la raíz cuadrada de 2 es "inconmensurable". Parece que los pitagóricos habían descubierto esta inconmensurabilidad en fecha anterior,[16] pero al darse cuenta de que echaba por tierra sus doctrinas de que toda línea se componía de una cadena de unidades finitas e iguales, y que la naturaleza está regida por números enteros, trataron de guardar su fatal descubrimiento; pero la verdad no podía mantenerse oculta siempre, y se cree que esto explica por qué los griegos desterraron la idea de los números y las medidas exactas de su geometría.

El matemático Zenón (495-435 a. C., que no debe confundirse con Zenón de Citio, filósofo de fecha posterior) posiblemente ideó sus famosas paradojas con intención de enseñar la misma lección, aunque hay opiniones diferentes a este respecto. La más conocida es la paradoja de Aquiles y la tortuga que van a competir en una carrera, recibiendo la tortuga, por ejemplo, una ventaja de 1 000 yardas. ¿Puede Aquiles alcanzar a la tortuga en algún momento? Zenón demostraba que si las ideas de los pitagóricos respecto de la longitud estuvieran fuera de

duda, aquél no alcanzaría nunca a la tortuga. Porque Aquiles pronto recorrió las 1 000 yardas que la tortuga llevaba como ventaja, en tanto que la tortuga sólo había recorrido 100. Puede ahora suponerse que la carrera comienza de nuevo, pero el adelanto de la tortuga se ha reducido a 100 yardas. En la segunda etapa Aquiles cubre estas 100 yardas, mientras que la tortuga sólo recorre 10. Y así continúa la carrera, etapa tras etapa, y la ventaja en cada una de ellas se reduce a la décima parte de su valor anterior. Mas éste jamás se reduce a cero; y después de infinito número de etapas, la tortuga está todavía delante. Aquiles y la tortuga, ambos han cubierto infinito número de etapas, consistiendo cada una, según las concepciones de Pitágoras, en un finito número de unidades finitas, de suerte que la total distancia recorrida tiene que ser infinita. Si los pitagóricos tuvieran razón, Aquiles jamás podría alcanzar a la tortuga, lo cual, naturalmente, es absurdo.

Por último, los pitagóricos prestaron mucha atención a los sólidos regulares: figuras sólidas en las cuales todos los lados y ángulos son iguales. Conocieron cuatro de esos sólidos, los cuales estaban formados por caras que eran cuadrados o triángulos equiláteros. El más sencillo es el cubo, formado por seis caras que son cuadrados y que están mutuamente en ángulo recto. Luego viene la pirámide de cuatro caras, o tetraedro, cuyas caras son triángulos equiláteros; el de ocho caras u octaedro, cuyas caras son también triángulos equiláteros; y una figura más complicada, el icosaedro, que tiene por caras 20 triángulos equiláteros. Finalmente, Hipaso descubrió el dodecaedro, cuyas caras son 12 pentágonos regulares, hacia el año 470 a. C. (p. 38). Éste, como sabemos hoy, completa la lista de los sólidos regulares.

Para el matemático moderno estos varios estudios parecen referirse sólo a cuestiones relativamente triviales. Para los griegos, imbuidos en la idea de que el universo era fundamental-

mente algo de perfecta regularidad, esto parecía ser de la mayor importancia. Veremos después cómo sobrevivieron en edad posterior y son conocidos por sus esfuerzos para descubrir la disposición y movimiento de los planetas.

Arquitas. La obra de los primeros pitagóricos fue continuada y extendida por la generación siguiente de aquella sociedad, aunque dirigían también su atención a nuevos fenómenos. Entre los últimos pitagóricos merece especial mención Arquitas (hacia el año 400 a. C.), persona de lo más ilustre, que fue siete veces gobernador de la ciudad de Tarento. Estuvo especialmente interesado en las aplicaciones mecánicas de la ciencia, y se dice que estudió la teoría de la polea. Construyó asimismo cierto número de juguetes mecánicos, incluyendo pájaros voladores, de suerte que acaso debiéramos considerarlo como el padre de la ciencia aeronáutica. Esta ampliación de las aficiones pitagóricas no era recomendable para todos los miembros de la sociedad y, cuando Arquitas se ahogó en un naufragio, alguno de sus miembros más conservadores afirmó que fue un oportuno final para quien se había desviado tanto de las líneas de estudio trazadas por su fundador.

Arquitas se hizo famoso por su solución del problema de la "duplicación del cubo", problema mucho más difícil que la duplicación del cuadrado, mencionada anteriormente. Había sido éste uno de los famosos problemas no resueltos de la Antigüedad, conocido como *el problema de Delos,* por la siguiente razón.

En el año 430 a. C., o poco más o menos (así lo dice Filópono), los atenienses fueron afligidos por la aparición de la peste (probablemente fiebre tifoidea), y enviaron al templo de Apolo, en Delos, unos emisarios para averiguar cómo podía atajarse aquélla. El oráculo les dijo que doblaran el tamaño del altar de Apolo en Atenas, el cual era de forma cúbica. Al recibir este consejo, los atenienses duplicaron la altura, la longitud y el ancho del altar. Esperaban que cesara la peste, pero lo que pasó

fue que se agravó. Cuando fue enviada a Delos una segunda comisión, se les explicó que el triple duplicado de las dimensiones del altar no había simplemente duplicado el volumen, como el dios había pedido, sino que lo había hecho ocho veces mayor. De aquí la importancia de saber cómo hacer el doble de un cubo dado.

La solución que dio Arquitas era sumamente intrincada, dependiendo de las propiedades de la curva complicada en la cual un semicírculo en rotación corta a un cilindro inmóvil; es interesante mostrar hasta qué alto grado de conocimiento geométrico y de habilidad habían llegado los pitagóricos de aquel tiempo. Debemos también tomar nota de la notable habilidad demostrada por los sacerdotes que servían el altar de Delos al plantear un problema que probablemente esperaban que no sería resuelto antes de que la peste siguiera su curso.

La escuela ateniense

Mientras que la escuela pitagórica declinaba en número y fuerza, una nueva escuela científica se estaba desarrollando en Atenas, que entonces había llegado a ser la capital y centro cultural de Grecia. Para comprender cómo se había producido esto, debemos recordar la historia de los años 490-480 a. C.: la década de Maratón, de las Termópilas y de Salamina.

Al oriente de Grecia estaba el reino de Persia, con su poder que aumentaba rápidamente y sus desmedidas ambiciones. El emperador Darío quería extenderse hacia occidente y, de este modo, entró en conflicto con las colonias jonias de la franja costera del Asia Menor, como igualmente con las ciudades de Atenas y Eretria, que enviaron auxilio a aquéllas. No era todavía Grecia una nación unida sino un conjunto de ciudades-Estado aisladas entre sí, cada una debiendo lealtad únicamente a su propio gobierno local, de suerte que, cuando los jonios fue-

ron derrotados, quedó sola Atenas, o casi sola, frente al choque de los persas. No obstante, cuando ambas fuerzas se encontraron en Maratón en el año 490 a. C., fueron los persas los que abandonaron el campo.

El inmediato sucesor de Darío, Jerjes, atacó a los aún desunidos griegos con un vasto ejército, reputado, aunque sin duda alguna erróneamente, de contar con una fuerza de cinco millones de hombres. Los espartanos enviaron una pequeña fuerza contra aquél, y cuando fueron aniquilados hasta el último hombre, en el paso vital de las Termópilas, toda el Ática, incluyendo Atenas, quedó abierta al enemigo. Hubo luchas en el mar frente a Salamina, y en tierra en Platea. Cuando los enemigos fueron todos derrotados en ambos lugares, se retiraron de Europa y la amenaza por el oriente fue, por el momento, suprimida. Pero, con el objeto de evitar semejantes riesgos en el futuro, las diferentes ciudades-Estado se fundieron, formando la confederación de Delos, en una sola nación con Atenas como capital.

Hipócrates de Quíos. En el siglo v de Atenas encontramos tres matemáticos de importancia. En primer lugar viene Hipócrates de Quíos (no hay que confundirlo con el más famoso Hipócrates de Cos, el médico), que nació en Quíos, una de las islas jonias, hacia el año 470 a. C., y tuvo fama de haber cuadrado el círculo. Empezó su vida como mercader, y se dice que fue a Atenas aproximadamente a la edad de 40 años para salvaguardar sus intereses en un pleito y se asoció allí con instructores y filósofos y, finalmente, él mismo abrió una escuela.

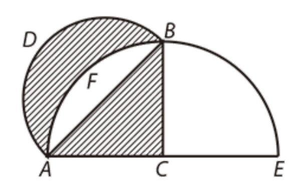


Figura II.10.

Sin embargo, no había hecho la cuadratura del círculo. En la figura II.10., la línea *AB* es base del triángulo rectángulo *ACB* y es también diámetro del círculo *ADB,* de suerte que el cuadrante *ACB* del círculo mayor será igual en área al semicírculo *ADB* del círculo menor. Sustrayendo de cada una de estas áreas la parte *AFB* (la no sombreada) que tienen en común, encontramos que la lúnula sombreada *ADBF* es igual en área al triángulo sombreado *ACB.* De este modo Hipócrates había cuadrado la lúnula *ABDF,* que era algo como un círculo, al menos estaba limitada por curvas, y de aquí su reputación.

También Hipócrates ensayó, aunque sin éxito, duplicar el cubo. Los matemáticos atenienses se concentraron especialmente en tres problemas: *1*) La duplicación del cubo; *2*) la cuadratura del círculo; *3*) la trisección del ángulo, todos los cuales parecen sencillos, pero sabemos ahora que no tienen solución por medio de la regla y el compás, que son los métodos de que disponían aquéllos para hallar las soluciones. La explicación de esto que parece el planteo de rompecabezas, acaso estaba en que todos los problemas aparentemente sencillos ya habían sido resueltos, excepto los pocos que eran insolubles.

De esta suerte viene a resultar que la mayor obra de Hipócrates fue nada más que un libro de texto de geometría, el primero de que tenemos noticia y, de acuerdo con Proclo, el primero que se haya jamás escrito. Poco sabemos de su contenido; pero ha podido tener influencia, y acaso servido de modelo para el más famoso *Elementos de geometría* de Euclides, que se publicó algunos años más tarde, por lo cual en alguna medida debe provenir de Hipócrates el modo de enseñar la geometría en las escuelas de Europa durante más de 2 000 años.

Platón. Vamos inmediatamente a Platón, el gran filósofo. Nació en Atenas en el año 429 a. C., y se hizo discípulo de Sócrates en 407. Emprendió sus viajes cuando los atenienses llevaron

a la muerte a Sócrates en el año 399 a. C., y estudió matemáticas en varios países, Volvió a Atenas hacia el año 380 a. C., y fundó la escuela conocida como la Academia, que duró aproximadamente mil años. Platón murió en 347 a. C.

La fama de Platón está, naturalmente, en su filosofía; pero sus escritos demuestran que conocía y entendía bien las matemáticas. Y, no obstante, se le ha atribuido siempre sólo un hallazgo matemático de cierta importancia, y esto acaso erróneamente. Es otro intento de duplicar el cubo.

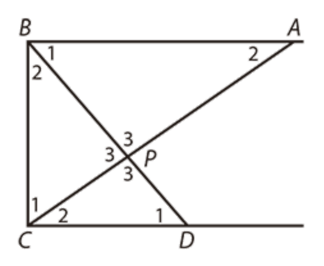


FIGURA II.11.

En la figura II.11. los ángulos en *B, C* y *P* son todos ángulos rectos, de suerte que los tres ángulos señalados con un 1 son iguales, como lo son también los tres ángulos señalados con un 2, y los tres ángulos señalados con un 3. Por consecuencia, los tres triángulos que tienen a *P* como vértice, *APB, BPC* y *CPD,* son todos ellos semejantes, y se deduce, pues, que:

$$\frac{PA}{PB}=\frac{PB}{PC}=\frac{PC}{PD}, \text{ y por tanto } \left(\frac{PA}{PB}\right)^3=\frac{PA}{PB}\times\frac{PB}{PC}\times\frac{PC}{PD}=\frac{PA}{PD}$$

Si, entonces, conseguimos que *PA* sea el doble de *PD,* un cubo de arista *PA* tendrá exactamente el doble del volumen de un cubo de arista *PB,* y el problema de duplicar el cubo está resuelto. No hay manera alguna de arreglar esto con la regla y el compás, pero es fácil hacerlo con un dispositivo mecánico en el cual unas regletas se deslicen sobre la superficie de un tablero plano mientras unos pasadores que atraviesan las regletas se deslicen por ranuras excavadas en el tablero. Platón desaprobaba el uso de todo instrumento que no fuera la regla y el compás,

y, no obstante, el empleo de este instrumento pudo haber salvado a Atenas de la peste.

Aunque la contribución directa de Platón a la matemática fue poca o ninguna, debió ejercer inmensa influencia en el desarrollo de aquélla. Decía con insistencia que debía enseñarse en sus aspectos abstractos y no para fines utilitarios. Los pitagóricos habían profesado análogas ideas, siendo una de sus máximas: un teorema y un paso adelante, no un teorema y un "óbolo". Estudiada con este espíritu, Platón la consideraba como modelo para todos los demás estudios, a causa de su certeza y exactitud, y estimaba que era la mejor preparación del pensamiento lógico. Sobre el pórtico de su Academia estaba inscrito el siguiente aviso: ἀγεωμέτρητος μηδεὶς εἰσίτω ("no puede entrar quien no sepa geometría"), que no era amenaza vacía de sentido, porque se refiere que un candidato fue rechazado porque no sabía geometría. Parece ciertamente que no había límite alguno para la fe de Platón en el valor educativo de las matemáticas. Cuando tenía 60 años de edad, poco más o menos, Dionisio II, el joven tirano de Siracusa, lo requirió para que infundiera sabiduría y virtud en su corte. Platón intentó hacerlo enseñándoles geometría hasta que, según palabras de Plutarco, que refiere el suceso, el palacio entero se convirtió en "un remolino de polvo" porque el príncipe y los cortesanos trazaban sus diagramas sobre los pisos de arena. Pero el príncipe decidió prontamente que otros métodos conducían de manera más directa al resultado deseado, y Platón regresó a Atenas.

Eudoxio. Un tercer miembro de la escuela ateniense que debemos mencionar aquí es Eudoxio (408-355 a. C.). Su astronomía fue más importante que su matemática (p. 83), aunque ésta, por desgracia, se ha perdido totalmente, parece haber sido de una calidad de primer orden.

Menecmo y las secciones cónicas. Eudoxio marchó de Atenas para fundar una escuela en Cícico, y allí su discípulo Menecmo (375-325 a. C.) inició el estudio de las secciones cónicas.

Si cortamos un sólido con un cuchillo o una sierra, o si imaginamos la intersección de un sólido geométrico por un plano, obtenemos la sección transversal del sólido, la cual estará limitada por una curva que podemos llamar *curva de intersección*. Por ejemplo, la curva de la sección de una bola de billar es siempre una circunferencia de cualquier manera que se haga el corte. Los sólidos más complicados dan origen, naturalmente, a secciones más complicadas. Por ejemplo, la sección de un cilindro es una circunferencia si la sección se hace en ángulo recto con el eje; pero en cualquier otro caso es la curva que llamamos *elipse* (especie de circunferencia alargada).

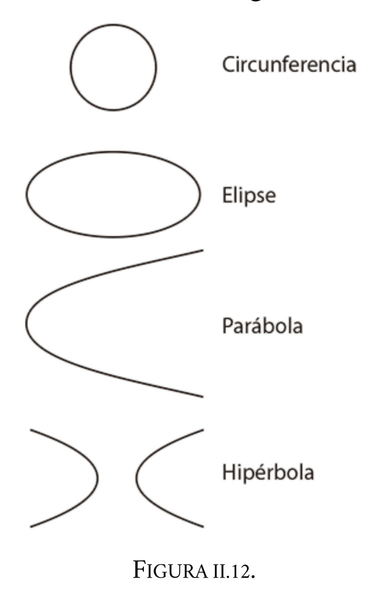


Figura II.12.

Menecmo examinó la curva de la sección de un cono y halló que podía ser alguna de las tres curvas que conocemos como secciones cónicas, llamadas elipse, parábola e hipérbola (figura II.12.).

Las secciones cónicas introducidas así en la ciencia estaban destinadas a desempeñar parte importante en el futuro desarrollo del conocimiento (p. 102), pero aún no había llegado su tiempo. Los resultados inmediatos que obtuvo Menecmo no fueron, ni importantes en sí mismos ni se emplearon para nada importante. Menecmo los empleó principalmente para construir dos soluciones más del ahora apolillado problema de la duplicación del cubo.

No solamente este problema particular, sino también el total de la matemática griega estaba también apollándose. Si queremos seguir las huellas de los pasos más importantes en el progreso matemático, y, en general, del conocimiento científico, tenemos que volver la espalda a Grecia y trasladarnos a Egipto, más particularmente a la nueva y magnífica ciudad de Alejandría; pero antes de que nos embarquemos en el estudio de las matemáticas alejandrinas examinemos qué progresos habían hecho la física y la astronomía durante el periodo que acabamos de examinar.

Física y filosofía griegas

El físico moderno enfoca sus problemas según un plan completamente definido que los alejandrinos conocieron vagamente (p. 148) y que, como luego veremos, fue enseñado a los modernos por Roger Bacon, Leonardo da Vinci, Francis Bacon, Galileo y otros. Su esencia es enfocar el problema, no en total, sino por fragmentos, y comenzar, no basándose en principios generales preconcebidos, sino en el conocimiento experimental establecido firmemente. Se elige un fenómeno especial o alguna propiedad especial de la materia, para hacer de ello un estudio experimental detallado, con la esperanza de que por ese medio se puedan descubrir la ley y el orden en un pequeño rincón del universo. Conseguido esto, el campo de conocimiento

se extiende un poquito más, interrogando la naturaleza en cada paso hacia adelante mediante un experimento inequívoco.

La física griega era algo por entero diferente. Los griegos no podían seguir el método que acabamos de describir; incluso si lo hubieran querido seguir les faltaba habilidad experimental y equipo. Pero en ningún caso lo hubieran deseado así, y esto por dos razones.

En primer lugar, tal procedimiento era completamente extraño a sus modos de pensar. No necesitaban fragmentos de conocimiento acerca de rincones aislados del universo, sino una equilibrada y comprensiva visión del todo.

En segundo lugar, su actitud en general frente a la vida resultaba en muchos casos una positiva aversión contra el aumento de conocimiento mediante la experimentación. En los asuntos ordinarios de la vida estimaban la actividad espiritual muy superior a la física, la cual, pensaban, era indigna de hombres libres y sólo propia de esclavos. En algunas ciudades no se permitía a los hombres libres ocuparse en oficios mecánicos. Como decía Jenofonte: "Las artes mecánicas llevan un estigma social, y son justamente deshonrosas en nuestras ciudades. Porque esas artes dañan el cuerpo de los que trabajan en ellas [...] obligándoles a vida sedentaria y a una vida de puertas adentro, y, en algunos casos, a consumir el día entero junto al fuego. Esta degeneración física lleva también a la degeneración del alma". Naturalmente, la ciencia experimental cayó bajo la sombra de esta desaprobación.[17] Tal actitud alcanzó su culminación en Platón. Antes que él muchos habían comentado lo engañosos que son los sentidos humanos; pero él llegó hasta el punto de argüir que su testimonio debería usarse sólo para sugerir problemas ideales a discutir o para gimnasia intelectual. "Mientras vivimos, estaremos más próximos al conocimiento cuando evitemos, en la medida de lo posible, comercio y comunión con el cuerpo, y nos conservemos puros en relación en él hasta que

Dios nos libere." En astronomía pensaba que los movimientos de los cuerpos celestes debían estudiarse únicamente como aportación de aproximaciones a los movimientos ideales de absoluta rapidez y absoluta lentitud; estos movimientos absolutos pueden captarse sólo por la razón y la inteligencia, y no por la observación; "como en geometría, deberíamos emplear problemas, y dejar a los cielos en su soledad, si queremos estudiar el sujeto en la manera justa". Emitía queja semejante sobre los músicos, que preparan su oído antes que su entendimiento: "Los maestros de armonía comparan solamente los sonidos y las consonancias que han oído, y su labor, como la de los astrónomos, es vana".

No es, por consiguiente, extraño que la primitiva física griega consistiera principalmente en pensamiento abstracto de un género que nosotros describiríamos ahora como especulación sin base. Sin contacto con el mundo exterior, y guiados únicamente por sus ideas individuales respecto de la utilidad de las cosas, los griegos trataban de descubrir el plan del mundo en su conciencia interna. Algunos opinaban que el mundo debe de haber sido construido por su hacedor según cierto sencillo y elegante arquetipo. Otros, suponiendo que la circunferencia era la curva perfecta, daban como conclusión que la mayor parte de los movimientos naturales deben ser circulares. Aun otros suponían que debe de haber una especie de gobierno moral en el universo; por ejemplo, Anaximandro, el evolucionista, pensaba que todas las cosas existentes han de desaparecer con el tiempo, como para enmendar la injusticia que habían cometido echando de la existencia a sus predecesores.

Aparte del embrollo resultante de tales confusas e inconsistentes especulaciones, se destacan con alguna claridad dos principales escuelas de pensamiento. El universo visible consiste en materia en actividad; una de aquellas escuelas se concentraba en la materia y trataba de descubrir su naturaleza; la otra

se concentraba en la actividad y buscaba descubrir su significación. Una se interesaba por los actores; la otra por la representación; de modo aproximado corresponden a nuestros modernos materialistas e idealistas. La primera de aquellas escuelas se desarrolló principalmente en Jonia; la segunda, en Italia, formada sobre todo por los pitagóricos y sus partidarios.

Materialismo jonio

Era natural que los griegos, en su continuo esfuerzo por llegar a elegantes generalizaciones, creyeran que toda la variada riqueza de la naturaleza podía explicarse con una sencilla fórmula. Empezaron por atribuirla a alguna sustancia común de la cual fue hecho el mundo, en total. En la época primitiva de la ciencia europea, la cuestión planteada en el primer plano de las especulaciones de los filósofos era: "¿De qué están hechas todas las cosas?"

Tales contestó con la sencilla palabra *agua,* pero evidentemente esta respuesta no significaba lo mismo para él que para nosotros. Decía que "lo que existe" puede tomar las tres formas de niebla, agua y tierra, con lo cual aquél significaba quizás mucho de lo que nosotros entendemos cuando decimos que la materia puede existir en los estados gaseoso, líquido y sólido. Escogió el agua como la estofa fundamental, porque tomó como características externas del mundo la fluidez y la humedad; aquella estofa estuvo siempre sometida a cambio, de modo que éste sería imposible en una contextura sólida.

Anaximandro, el evolucionista, siguió camino diferente, sosteniendo que el primer principio y constituyente básico de todas las cosas era un "medio continuo e infinito" que llenaba todo el espacio. Fue ésta la primera aparición del llamado *éter,* que ha permanecido en la ciencia hasta el presente siglo. La descripción que hace Anaximandro de las funciones físicas del

éter nos recuerdan las descripciones semejantes dadas por los físicos del tiempo de la reina Victoria, en tanto que su descripción de sus funciones filosóficas ("del cual todas las cosas son engendradas y al cual todo vuelve") nos recuerda la descripción del espacio-tiempo (p. 339) dada por el filósofo Alexander del siglo XX.

Cincuenta años después de Tales, su sucesor directo, Anaxímenes (585-525 a. C.) comparó las cosas, en su naturaleza esencial, con el aire en lugar del agua. La sustancia básica del universo, decía aquél, era πνεῦμα, *aliento,* como el aire que respiramos; afirmaba que, exactamente igual que el aire sostiene nuestra vida humana, una forma general de aire sostiene toda la vida del universo. Y para Anaxímenes, como para Tales, anterior a él, todas las cosas están dotadas de vida. Creía, además, que las diferentes formas de materia cambiaban entre sí respectivamente por medio de procesos de condensación y rarefacción. De esta suerte, cuando el agua estaba rarificada, se convertía en aire, y cuando a la vez estaba rarificada y calentada, se convertía en fuego, el cual no era otra cosa que aire caliente. Creía asimismo que la condensación del agua producía tierra, creencia cuyas huellas sobrevivieron hasta el siglo XVII (p. 303). De suerte que, para Anaxímenes, los cuatro elementos, tierra, agua, aire y fuego, que habían de figurar tan extensamente en la física griega especulativa (p. 82), eran todos modificaciones de una misma sustancia.

Pasaron 50 años más, y Heráclito de Éfeso (540-475 a. C.) enseñó que el fuego, la más cambiante de todas las sustancias, era el prototipo de todas las cosas. Toda cosa, decía aquél, empieza como fuego; pero el fuego se cambia en agua y el agua en tierra. Su doctrina principal era que toda cosa se halla en estado de flujo (πάντα ρεῖ, καὶ οὐδὲν μένει: "todo fluye y nada permanece inmóvil"); nunca pasamos dos veces el mismo río.

Atomismo. Doctrinas por completo diferentes enseñaron los siguientes jonios de nota: Leucipo de Mileto (de fecha incierta) y su discípulo Demócrito (470-400 a. C.[18]), quien ciertamente es posible que fuera de Milesia. Sostenían éstos que el universo no era otra cosa que átomos inalterables y el espacio que había entre ellos. Los átomos no sólo son indivisibles, como significa su nombre ἀ-τέμνειν, sino también uniformes, sólidos, duros e incompresibles. Su sustancia era indestructible, y lo mismo su movimiento; un átomo continuaba moviéndose en tanto que no encontraba algo con qué chocar.

Nada vital había en este cuadro; los cambios en el universo no resultaban de cambios intrínsecos de los átomos, sino de sus movimientos y nuevas disposiciones relativas entre sí que provenían de imperiosa necesidad. De esta suerte el universo vino a ser una máquina que seguía un camino predestinado.

Estas doctrinas disminuyeron la importancia de las percepciones y emociones humanas, las cuales se convertían en leves incidentes en el mundo e impulsaban a la existencia de un mundo objetivo, externo al hombre, independiente del hombre e indiferente al hombre. En pocas palabras, había sido descubierta la naturaleza externa. El mundo, que hasta aquel momento había sido campo de recreo y terreno de placer, se convirtió en su prisión. Hasta entonces había estado empapado en belleza, dulzura y entusiasmo (dones hechos por los dioses a los hombres); pero ya estos dones no formaban parte de la naturaleza; eran obra de la imaginación del hombre mismo. Demócrito escribió: “De acuerdo con las convenciones, hay dulce y amargo, hay caliente y frío; de acuerdo con las convenciones, hay color. Pero, en realidad, son átomos y el vacío. Los objetos de sensación se suponen reales y usualmente se consideran como tales; pero, en verdad, no lo son. Únicamente son reales los átomos y el vacío”.

Físicamente, estas teorías tenían mucho en común con la moderna teoría atómica; pero no estaban basadas en conocimiento ni en observación. Filosóficamente eran casi idénticas al materialismo filosófico de hoy, y, de igual manera que éste, implicaban la negación del libre albedrío. El hombre no podría elegir qué es lo que debe hacer; esto ha sido decidido, para él, hace largo tiempo por la disposición de los átomos. El determinismo había entrado en la ciencia, pero los griegos lo llamaban *compulsión* (ἀνάγκη φύσιος, "necesidad de llegar a ser").

Los elementos pitagóricos

En tanto que los jonios estaba describiendo el universo como algo fundamentalmente sencillo, los pitagóricos y el siciliano Empédocles de Agrigento (500-440 a. C.) abogaban por una visión del mundo más complicada, remplazando la sustancia fundamental de los jonios por cuatro distintos "elementos": tierra, agua, aire y fuego. Enseñaron que todas las cosas estaban formadas por estos cuatro elementos mezclados en diferentes proporciones bajo la influencia de tendencias atractivas y repulsivas, y como su pensamiento no expresaba una distinción clara entre el hombre y el mundo inanimado que lo rodea, se supone que esto era también cierto para el hombre, y en este caso las fuerzas atractivas y repulsivas asumían las formas de amor y odio.

Los cuatro elementos estaban, ellos mismos, formados por atracciones y repulsiones de dos pares de cualidades opuestas: caliente y frío, húmedo y seco. De este modo se combinaban de acuerdo con el siguiente esquema:

	Seco	Húmedo
Frío	Tierra	Agua

Caliente	Fuego	Aire

Hemos de ver cómo estas ideas, por alejadas que estén de la verdad, vendrían a representar una parte no pequeña de la evolución posterior del pensamiento físico.

Empédocles enseñó que el universo había comenzado como una mezcla caótica de los cuatro elementos. Primero fue separado de la mezcla el aire, y después, el fuego; a éstos siguió la tierra, de la cual salió exprimida el agua. Los cielos estaban formados del aire, y el sol del fuego, mientras que las "otras cosas" de la tierra fueron formadas con lo que quedaba.

Hizo Empédocles una contribución más valiosa cuando enseñó que la luz viaja a través del espacio con rapidez finita; emplea ella tiempo en pasar de un sitio a otro, desde el objeto visto al ojo que ve.

Platón y Aristóteles como físicos

Cuando la física estaba todavía en la primera etapa de su desarrollo le hicieron sufrir dos desastres mayores las actitudes de los dos grandes pensadores Platón y Aristóteles. Platón era desdeñoso y poco simpático, en tanto que Aristóteles no consiguió comprender la función que corresponde llenar a la física.

Platón. Hemos visto que Platón era un matemático más que mediano, que profesaba alta consideración a los estudios matemáticos. Pero esta consideración en él provenía de que la matemática trataba con cosas espirituales y no porque condujera al mejor conocimiento de las cosas materiales; admiraba la matemática pura, no lo que nosotros llamamos ahora matemáticas aplicadas, que no existían en su tiempo. Como los filósofos de muchas edades, vio que nuestro único verdadero conocimiento es el de las sensaciones que afectan a nuestro espíritu. Puede parecer que éstas se originan en un mundo exterior de materia, pero la existencia de ese mundo exterior es sólo una hipótesis.

El espíritu puede ser la única realidad, y el mundo exterior sólo invención de nuestro espíritu. Platón aceptó una variante de este último punto de vista; veía el espíritu como la única realidad fundamental, y el mundo material sólo como una sombra de la realidad. Hemos venido al mundo (sostenía) con un número de ideas generales innatas en nuestro espíritu, como las ideas de dureza, rojez y esfericidad. A esas ideas las llamaba *formas*. Cuando decimos que vemos una pelota roja y dura queremos decir simplemente (así decía Platón) que alguna cosa que está afectando a nuestros sentidos parece tomar forma, ya en nuestro espíritu, de dureza, color rojo y esfericidad. El objeto puede adoptar las formas de buena o de mala manera, pero en ningún caso serán perfectas; ningún objeto material puede, en ningún caso, ser tan absolutamente esférico como lo es nuestra idea de una esfera, o tan completamente rojo como nuestra idea de ese color. Platón, creyendo que la perfección y la realidad iban necesariamente juntas, sostenía que las formas eternas e inalterables deben ser las verdaderas realidades del mundo, en tanto que los objetos materiales que van y vienen, y en el mejor caso proporcionan únicamente fugaces impresiones y representaciones imperfectas de las formas, tienen un grado de realidad inferior; su relación con las realidades es la misma que la de círculos que los matemáticos trazan en la arena a los verdaderos círculos. (Podemos ver por qué Platón pensaba que los problemas físicos deberían estudiarse como idealizados por nuestro espíritu más que como presentados por nuestros sentidos.) De esta manera, en su última esencia, el mundo no parece agua, aire, fuego, ni duros átomos, sino espíritu.

Un hombre de ciencia moderno combatiría todo esto basándose en que las formas platónicas no estaban innatas en nuestro espíritu, sino que son clasificaciones que éste crea tomadas de la experiencia. Diría, por ejemplo, que un ciego no puede tener en su espíritu la idea de rojo, ni un sordo la del sonido de la

trompeta; si encontramos aquellas formas en nuestro espíritu es porque no somos ciegos ni sordos, sino que hemos visto y oído mucho en nuestra vida. Mas Platón, obsesionado por su doctrina de las formas innatas, encontró el estudio de la nebulosa sustancia que llamamos materia carente de importancia. En mayor grado que la mayor parte de los hombres tenía la concepción, verdadera o errónea, de que la única cosa de valor mientras pasamos por la humanidad era la busca de la bondad y de la belleza, dos cualidades que los griegos identificaban tan completamente que usaban la misma palabra para ambas. Por esta causa aborrecía especialmente las doctrinas de Demócrito, que explicaban la humanidad, la bondad y la belleza como manifestaciones mecánicas de átomos materiales. Nunca menciona a Demócrito por el nombre, y se dice que alguna vez expresó el deseo de que todos sus libros fueran quemados.

Podemos ver su actitud general frente a la ciencia física por algunas observaciones que puso en boca de Sócrates.[19] El astrónomo Anaxágoras (p. 76) había escrito un libro donde afirmaba en primer lugar que "En el principio todas las cosas estaban mezcladas, luego vino el espíritu y las puso en orden", y después procedía a explicar en términos mecánicos cómo se había efectuado esto. Dice Sócrates que él esperaba que el libro le dijera, en primer lugar, si, por ejemplo, la Tierra es redonda o plana, y luego que explicara la razón de ello, principalmente que "es mejor que la Tierra sea como es" que si fuera de otra manera. Continúa así:

> Porque yo no podría imaginar que, una vez que había dicho que estas cosas las ordenaba el espíritu, les hubiera asignado cualquier otra causa, excepto el hecho de que son como mejor podrían ser. Estas esperanzas yo no las hubiera vendido por una gran suma de dinero. Desde lo alto de estas esperanzas, por lo tanto, me derrumbé cuando, prosiguiendo en mi lectura, encontré a mi filósofo apartando a un lado el espíritu y otros principios de orden y buscando el recurso de aires, éteres, aguas y otras excentricidades.

Difícilmente pudo haber más completa falta de comprensión de los fines y métodos de la física.

Aristóteles. La actitud de Platón fue el desastre número uno para la física; pero aún peor había de ocurrir con su discípulo Aristóteles. A la temprana edad de 17 años había dejado Aristóteles su pueblo natal, Estagira, en el rudo, semibárbaro Estado de Macedonia, al norte de Grecia, donde su padre era médico de la corte, para estudiar con Platón en Atenas, y allí permaneció hasta la muerte de su maestro, 20 años después. Entonces vivió en Lesbos, una de las islas frente a la costa del Asia Menor, durante los cinco años de 347 a 342 a. C. Después de esto fue durante seis años tutor del joven príncipe Alejandro de Macedonia, que había de ser conocido más adelante como Alejandro Magno, el conquistador de la mayor parte del mundo civilizado, y fundador de un imperio que se extendió desde Grecia hasta la India y desde la Tracia hasta Egipto. En 334 a. C. volvió a Atenas donde se hizo maestro público y fundó la famosa escuela de los peripatéticos. Parece que allí no se encontró con la entera aprobación de sus hermanos los filósofos, muchos de los cuales objetaban que sus maneras eran más propias de una Corte que de academia; la barba larga y sucia y el traje raído no eran para él. En el año 323 abandonó nuevamente Atenas, y falleció al año siguiente.

En su juventud se distinguió por su afición voraz a la lectura; en sus años de madurez adquirió una inteligencia enciclopédica que se ejercitó en toda clase de conocimientos y de este modo invadió todas las ramas de la ciencia. Escribió sobre una vasta variedad de temas, vertiendo torrentes de claro pensamiento y buen sentido, el cual era generalmente dominado por un juicio penetrante y un profundo caudal de conocimientos. Pero en ciencia sus éxitos fueron muy desiguales; fue sagaz biólogo, pero débil físico. Su biología está basada en observación personal, y jueces competentes lo consideran como uno de los más grandes biólogos de todos los tiempos. Algunas de sus observaciones mantuvieron su importancia hasta los tiempos modernos, y

su clasificación de las formas de vida no ha sido sustituida hasta la época de Linneo. Pero la agudeza de su observación no le condujo a nada en física, ya que el mundo físico es demasiado complejo para que sus secretos los revele la mera inspección. En esto se necesitan experimentos planeados, y la idea de experimentación era ajena por completo tanto a Aristóteles como a sus contemporáneos.

En todo experimento suponemos que un acontecimiento es un efecto precedido de una causa; nosotros aportamos la causa y observamos el efecto, estudiando de este modo una relación en la cadena causa-efecto que nosotros creemos que circula por toda la naturaleza y gobierna todos sus acontecimientos. Esta cadena de causa-efecto no entraba en el pensamiento de Aristóteles. A la pregunta de "¿por qué es así *A* ahora el caso?" Nuestra contestación moderna es de la forma de "porque así fue *B* el caso antes". Pero la contestación de Aristóteles era de la forma: "porque está en la naturaleza de A el ser como es". Por ejemplo, nosotros contestamos a la pregunta de "¿por qué se eclipsa la Luna?", diciendo que la Tierra ha pasado entre el Sol y la Luna. Pero Aristóteles consideraba como suficiente respuesta el decir: "porque está en la naturaleza de la Luna el ser eclipsada". "Es claro —escribió— que la naturaleza de la cosa y la razón del hecho son idénticas."[20]

Tal modo de ver las cosas inhabilitaba manifiestamente a Aristóteles como físico. Se cree que sus trabajos biológicos los hizo cuando vivía en Lesbos, entre los años 37 y 42 de edad, que sus escritos de física son posteriores a su regreso a Atenas. Andaba ya entonces por los 50, de suerte que su inteligencia no era ya maleable a las nuevas ideas, sino que estaba conformada por su pensamiento biológico; toda ciencia pudo parecerle únicamente materia de observación y descripción.

Aparte de esto, Aristóteles defendió una visión del mundo completamente homocéntrica, considerando al hombre como

centro de toda la creación, su culminación y su triunfo final. Para él era el universo, primordialmente, un universo de sensaciones humanas, y la verdad definitiva de cada cosa la decían las sensaciones que producía en el cuerpo humano; lo más que podríamos jamás saber acerca de la miel es que era rubia y viscosa, húmeda y dulce. Aristóteles consideraba estas cualidades como absolutas, no como relativas al espíritu que las había percibido. Con estas malas ideas filosóficas equipaba un mal sistema de mecánica. Demócrito había enseñado que un cuerpo que se mueve continuaba su movimiento hasta que algo interviniera para alterarlo; pero Aristóteles interpretaba todo movimiento como una satisfacción de inclinaciones naturales; como si todas las cosas fueran organismos vivos. Así como una simiente tiende a germinar y abrir su camino al través del suelo, un cuerpo pesado tiende a sumergirse, y otro ligero a elevarse; todas las cosas tienden a alcanzar su "sitio natural" en el mundo. Así despide olor la rosa y cae la piedra. Convencido de la analogía biológica de que todas las cosas deben o atraerse o repelerse mutuamente, Aristóteles aceptó los cuatro elementos de Empédocles, tierra, agua, aire y fuego, como constituyentes de la materia; pero añadió un quinto elemento, la *quintaesencia,* para formar la sustancia básica del universo. Para justificar esto, defendía que son posibles dos géneros de movimientos: de arriba abajo y circular. De los cuatro elementos de Empédocles, el aire y el fuego se movían hacia arriba, en tanto la tierra y el agua se movían hacia abajo. Debe haber, por consiguiente, y de manera evidente, un quinto elemento que se mueva en movimiento circular, y éste solamente puede ser el éter, del cual están hechas las estrellas; un éter que es más divino que los otros cuatro elementos, y que debe también ser inmutable, puesto que no hay registro de que haya ocurrido cambio alguno en el firmamento ni en ninguna de sus partes.[21]

Generalmente se atribuye a Aristóteles la invención de la lógica formal (la lógica de la demostración rigurosa) y hay quienes piensan que esto fue aún peor para la ciencia que su física. Tenía razón en afirmar que ningún hecho podía ser cierto a menos que hubiera sido deducido en estricta lógica de otros hechos que eran ciertamente verdaderos; pero no vio que eso es justamente lo que nunca podemos hacer en la ciencia. Al exigir que todas las ciencias tengan la certeza de la matemática, Aristóteles les impuso las limitaciones de la matemática, la cual no puede nunca llegar a un conocimiento nuevo, sino que únicamente transforma el antiguo y lo presenta con nuevo ropaje. Escribió muchísimo sobre gran número de cuestiones físicas, pero su método fue siempre deductivo, y como sus premisas eran casi invariablemente erróneas, sus conclusiones lo eran igualmente. Habían de pasar aproximadamente 2 000 años antes de que se desechara el método deductivo de Aristóteles en favor de los métodos inductivos (p. 148), y entonces el progreso fue efectivamente rápido.

Durante todo aquel tiempo, la mano muerta de Aristóteles cayó pesadamente sobre la física. Hubiera ocurrido de otra manera, y entonces la libre discusión y una mezcla de las ideas de Demócrito y de Empédocles (átomo y fuerza) podrían haber dado a la física un buen comienzo; porque es sorprendente ver el gran número de ideas básicas de la física moderna prefiguradas en las especulaciones de estos dos hombres.

Epicúreos y estoicos

El periodo que siguió a la muerte de Aristóteles fue de general confusión y fermentación (militar, política e intelectual). Alejandro había conquistado Grecia, y los griegos, doloridos por sus derrotas militares, habían perdido su anterior gozosa seguridad de sí mismos y su alegría irresponsable, y estaban sintiendo la necesidad de una filosofía o religión que los instru-

yera sobre cómo habían de vivir. Su cómoda religión olímpica nunca hizo esto; el cristianismo traería su propia solución a su tiempo; pero el tiempo no había llegado.

En aquella trastornada sociedad nacieron los dos nuevos sistemas filosóficos del epicureísmo y del estoicismo. Ambos eran apropiados al espanto de los tiempos. El epicureísmo era una filosofía de contento y felicidad, incluso en la desgracia, en tanto que el estoicismo lo era de dominio de sí mismo y devoción al deber. Ambos fueron principalmente sistemas de ética y de religión; pero como ambos invadieron las regiones ocupadas por la ciencia, son de cierto interés en este libro.

Los epicúreos. Epicuro, el fundador del primero de estos dos sistemas, nació en Samos, una de las islas jónicas, en el año 341 a. C., a una vida de salud débil y opresión agobiante, la cual indudablemente requería una nueva filosofía que la hiciera tolerable, por lo que enseñó la práctica de la vida sencilla, la tranquilidad espiritual y la paz interior. No era un científico, despreció el conocimiento por sí mismo y particularmente "las vanidades de la astronomía". No aceptó los cálculos de Aristarco sobre el tamaño del Sol y de la Luna (p. 107) con la observación de que el Sol era probablemente tan grande como parece, o quizás más pequeño, ya que los fuegos en la distancia con frecuencia parecen más grandes que lo son en realidad. Aceptó una estimación de Heráclito (p. 58) que decía que el Sol tenía aproximadamente un pie de diámetro; esto situaría al Astro Rey a la distancia de nuestra vista de 115 pies solamente.

Enseñó una física enteramente materialista, la cual negaba al espíritu la posición que Platón y Aristóteles le habían asignado como fundamental ingrediente del universo. Había estudiado las obras de Demócrito, y proclamaba que toda existencia es corpórea (τὸ πᾶν εστι σῶμα); no puede haber nada más que átomos y el vacío. Tiene que haber un vacío, o los átomos no tendrían espacio para moverse, y debe ser infinito en extensión,

porque no podría ser limitado sino por algo de diferente naturaleza, y esto no puede existir si los átomos y el vacío forman la suma total de toda existencia. Los átomos deben ser infinitos en número; de otra manera vagarían y se desparramarían en el vacío infinito, y al chocar con otros átomos no se mantendrían en su lugar. Los átomos se lanzan en todas direcciones a través del vacío con velocidades increíbles, "rápidos como el pensamiento", y sus nuevas disposiciones relativas entre sí, interminables, dan origen a la formación de nuevos mundos. Los objetos emiten, por siempre, delgadas películas de imágenes de sí mismos en sus superficies, y éstas, viajando en todas direcciones, cuando chocan con nuestros cuerpos producen las sensaciones, las que nos dan nuestro conocimiento del mundo.

Epicuro se ocupó de una manera especial en desacreditar la idea de un gobierno divino del mundo. Los dioses, decía él, son más hermosos y elevados que nosotros; pero son productos de la naturaleza exactamente igual que nosotros, y de esta suerte se hallan igualmente sujetos a las leyes naturales. No pueden, por consiguiente, gobernar el mundo, y son realmente indiferentes a los asuntos humanos; el hombre puede, no obstante, ser dueño de su destino y gobernar su alma. De esta manera Epicuro trató de liberar a los hombres de lo que Lucrecio llamó *la carga de la religión,*[22] aunque concedía que podían, si así lo deseaban, permanecer leales a los dioses tradicionales.

Los estoicos. El otro nuevo sistema filosófico fue fundado por Zenón, de origen fenicio, que nació en Citio, en Chipre, y fue a Atenas en el año 311 a. C., donde estableció una escuela y enseñó en el Stoa o Pórtico pintado. Su filosofía fue asimismo práctica y de acuerdo con las necesidades de los tiempos. Enseñó también una manera de renunciación al mundo; los hombres debían guiarse por su conciencia y razón antes que por sus deseos, afectos o emociones. Los mejores espíritus y los más no-

bles caracteres del mundo pagano se adhirieron al estoicismo o cayeron directamente bajo su influencia.

Como el epicureísmo, enseñó un sistema de física por completo material; incluso cosas como las virtudes y las actividades las describía como cuerpos (σώματα). Suponía que todo cuerpo consiste en un principio activo y en otro pasivo, respectivamente la materia inerte capaz de cambio y la fuerza causante de ese cambio. Así, todo cambio tenía su causa, y lo mismo para todo acontecimiento y todo movimiento en la naturaleza. Dos mil años antes de Newton los estoicos introdujeron la idea de que todo suceso se producía en concordancia con la ley universal. Las estrellas, las cuales, como entonces se estaba descubriendo, se mueven de acuerdo con leyes perfectamente regulares, deben formar parte de un plan majestuoso y con un fin determinado. De esta manera el mundo debe estar moviéndose hacia una perfección ya designada por Dios, pero que podía lograr en parte el hombre, de suerte que la vida humana se convertía en una cosa de dignidad y valor.

Estas teorías físicas de los estoicos y de los epicúreos tuvieron poco efecto en el desarrollo del pensamiento científico en Grecia.

La alta reputación de Aristóteles hizo que lo que él dijera se tuviera por irrecusable; sobre lo que Aristóteles se había pronunciado, así era, no sólo en el mundo griego en el cual vivió, sino también en el mundo medieval que estaba por venir. En este aspecto, la Iglesia cristiana apoyó sus doctrinas, que en verdad estaban más de acuerdo con el espíritu de la religión que el materialismo de Epicuro y de Zenón, y la física quedó cristalizada en un molde aristotélico hasta que empezaron a pensar por sí mismos los hombres en la época del Renacimiento; hasta que Stevin y Galileo empezaron a experimentar para descubrir si las cosas eran como había dicho Aristóteles, y encontraron que no lo eran.

Tales fueron las líneas principales seguidas por el pensamiento físico griego; pero sería un error pensar que éstos eran los únicos caminos a lo largo de los cuales trataba de progresar el pensamiento. La idea de que la naturaleza del universo podía ser discernida por el intelecto puro, y sin necesidad de apelar a los hechos, llevaba consigo su propia condenación, y algunos griegos debieron tener vaga conciencia de esto. De esta suerte, a despecho de su general aversión a interesarse por los hechos, algunos lo hicieron. Quizás se pueda encontrar el primer ejemplo en cierta observación de Anaxímenes (*c.* 550 a. C.), quien decía que si soplamos levemente en el dorso de nuestra mano, el aliento se nota caliente, en tanto que si soplamos violentamente, se nota frío. Anaxímenes interpretó equivocadamente estos hechos; mas nosotros vemos en ello el verdadero método experimental de pedir información a la naturaleza y anotar su respuesta.

Algunos años después (posiblemente incluso antes) los pitagóricos estuvieron experimentando en el tono de los sonidos musicales. Debe de haberse sabido sobradamente que los sonidos graves los producen grandes masas, y los sonidos agudos las pequeñas; el león ruge, pero el ratón sólo puede chillar. Los pitagóricos trataron de establecer una relación entre el tamaño y el tono. Boecio, que escribió en el siglo VI d. C., nos dice que Pitágoras mismo estaba observando la fragua de un herrero cuando le chocó la sucesión musical de sonidos producida por los martillos a medida que golpeaba en el yunque. Pesó los martillos, y halló que los pesos de cuatro de aquéllos estaban en la relación sencilla de 12 : 9 : 8 : 6,[23] en tanto que el quinto, que daba una nota discordante, no estaba en relación sencilla respecto del peso de los otros.

Se ha dicho que Pitágoras había hecho, después de este descubrimiento, una serie de experimentos con cuerdas y en-

contrado ciertas leyes que todavía forman la base de la ciencia acústica. Sabemos que las cuerdas de diferente longitud, pero que no difieren en otra cosa, producen notas de diferente tono. Cuando dos de esas notas se hacen sonar a la vez (o en sucesión, como los griegos las hicieron sonar), la combinación puede ser agradable o desagradable. El gran descubrimiento de los pitagóricos fue que es agradable únicamente si las longitudes de las cuerdas están justamente en relación numérica sencilla de una a la otra, como por ejemplo, de dos a uno, o de tres a dos. Hace más de 2 000 años que ellos descubrieron los hechos, pero nadie ha encontrado aún una explicación completamente satisfactoria de éstos. Los anotamos aquí como prueba de la creciente confianza en el experimento; incidentalmente los pitagóricos también establecieron la acústica como la más antigua de las ciencias experimentales.

Un siglo más tarde, aproximadamente, hallamos a Empédocles (p. 60) investigando mediante experimentos la naturaleza del aire. Colocaba el extremo inferior de una vasija tubular dentro del agua, y procedía como lo hacemos con una pipeta o cuentagotas. Mientras mantenía tapado con el dedo el extremo superior del tubo, la presión del aire interior apartaba el agua. Si retiraba el dedo, el agua entraba, y si entonces tapaba de nuevo con el dedo el extremo superior, el agua ya no salía del tubo aunque éste fuera sacado del agua; la presión del aire exterior al tubo mantenía el agua dentro de éste. Empédocles interpretaba estos hechos como demostrativos de que el aire era una sustancia capaz de ejercer presión. Unos cuantos años después, Anaxágoras repitió el experimento, y también, inflando unas vejigas, demostró que se necesitaba fuerza para comprimirlas. La idea de apelar experimentalmente a la Naturaleza iba ya por entonces haciéndose familiar.

Las primeras descripciones astronómicas

La mayor parte de las razas, incluso las más primitivas, han inventado cuentos para poder explicarse cómo se nos muestran la Tierra y el firmamento, la alternación del día y la noche y los fenómenos astronómicos más sencillos. La mayor parte, asimismo, idearon cosmogonías para explicar cómo las cosas habían llegado a ser lo que son. Los griegos no fueron una excepción, pero su astronomía, igual que sus matemáticas, demostraron la influencia de sus predecesores científicos, los babilonios y los egipcios.

Los babilonios habían descrito el universo como una vasta sala con el firmamento como techo y la Tierra como pavimento. Este suelo estaba rodeado de agua como un castillo lo está por un foso, y sobre el otro lado lejano del foso están emplazadas montañas que sostienen la cúpula del firmamento. Otras montañas cubiertas de nieve se elevan en el centro del pavimento y de éstas nació el río Éufrates, centro de la vida babilónica.

Los egipcios trazaron un cuadro semejante; ahora que éstos pusieron a Egipto en el centro del pavimento, imaginando posiblemente que la inundación anual del Nilo demostraba que aquélla era la parte más baja de la superficie de la Tierra. Cuatro enormes columnas sostenían un techo del cual estaban suspendidas las estrellas, como lámparas.

Los griegos primitivos adoptaron este cuadro general, pero pronto empezaron a perfeccionarlo. En los tiempos de Homero (es decir, en el siglo IX a. C.), imaginaban la tierra como un disco plano, con el océano, al cual llamaron río Océano, remplazando el foso de alrededor. Encima estaba la bóveda de los cielos, y

debajo el Tártaro, la mansión de los muertos, formando una segunda bóveda simétrica con los cielos.

Tales y Anaximandro. En el siglo vi a. C., Tales y Anaximandro enmendaron de nuevo este cuadro. Tales enseñó que la tierra flotaba en el agua, en tanto que Anaximandro se apartó aún más. Viendo que las estrellas giraban alrededor de la estrella polar, sacó la conclusión de que estaban adheridas a una esfera completa, en cuyo centro, sin soporte de ningún género, quedaba la Tierra suspendida libremente en el espacio. Imaginó que la Tierra podía permanecer en equilibrio de esta manera porque estaba a igual distancia de los demás cuerpos celestes: casi como si estuviera ya pensando que la Tierra estaba solicitada por fuerzas gravitatorias desde las otras masas del universo.

Esto supone un progreso evidente respecto de los diseños del universo que tenían los babilonios, los egipcios y Homero, ninguno de los cuales explica dónde o cómo pasa la noche el Sol. Entonces ya le era posible al Sol pasar bajo la Tierra en la noche, y no simplemente ser llevado en un barco por el foso circundante, como habían imaginado los egipcios. Pero el cuadro era demasiado revolucionario para exigir asentimiento general; quizás, también, exigía demasiada imaginación matemática. Poco tiempo después encontramos a Anaxímenes escribiendo que el Sol y las estrellas no pasan bajo la Tierra, sino que la esfera a la cual están fijados gira alrededor de la Tierra "como un gorro puede hacerse girar alrededor de la cabeza", conjetura que un mínimo de observación habría rechazado instantáneamente.

Anaximandro no hizo de su Tierra una esfera, sino un disco o cilindro cuyo grosor tenía un tercio de su diámetro. Decía que el Sol era del mismo tamaño que la Tierra y que giraba alrededor de ésta en una órbita que era 27 o 28 veces mayor que la Tierra. Pero esto no está apoyado por el razonamiento ni la observación; no son sino conjeturas desprovistas de base. Por

desgracia, era todavía bastante escasa la capacidad de observación de los griegos. Nadie, al parecer, se fijó en que la parte brillante de la superficie de la Luna da siempre cara al Sol, o que haya supuesto que la Luna debe su iluminación al Sol. En lugar de esto, hallamos a Anaximandro diciendo que las estrellas, en general, incluyendo la Luna, tenían como unos tubos proyectados desde ellas mismas, a través de los cuales veíamos su luz. El creciente y menguante de la Luna resultaba de que aquel paso era alternadamente abierto y cerrado. Si se cerraba por completo, entonces ocurría un eclipse.[24]

Los pitagóricos. En el siglo que siguió a Anaximandro se hicieron muchos e importantes progresos en astronomía, debidos a los pitagóricos, aunque, como es costumbre, es difícil señalar autores individuales.

En lugar del cilindro aplastado de Anaximandro suspendido libremente en el espacio, se dice que Pitágoras había creído que la Tierra era de forma esférica y que daba una vuelta sobre un eje una vez al día. Los pitagóricos también dieron el paso más importante de suponer que la Tierra no estaba en una posición fija en el centro del universo, sino que tenía movimiento de revolución, con todos los demás planetas, alrededor de un fuego central. Una narración atribuye la idea a Filolao (p. 108), otra a un cierto Hicetas de Siracusa. Si hubieran dado el paso siguiente de identificar este fuego central con el Sol, habrían dado uno de los más grandes pasos en toda la historia de la ciencia. Mas, por una u otra razón, jamás lo dieron. Se ha insinuado que el fuego central a que se referían significaba verdaderamente ser el Sol, pero que no osaron declararlo así por temor a encontrarse con persecuciones religiosas como la que después hizo víctima a Anaxágoras (p. 79). Por otra parte, dice Aristóteles que estaban convencidos de que el número total de objetos móviles en el firmamento tenía que completar su místico número 10. Este total lo componían el Sol, la Luna y cinco planetas co-

nocidos, que hacían el número siete, y la Tierra y la esfera de las estrellas fijas dos más. Para llegar al necesario número 10, imaginaron una "contraTierra" que también tenía movimiento de revolución alrededor del fuego central. Como no vieron jamás ni el fuego central ni la contraTierra, tuvieron que suponer que el hemisferio de la Tierra en el cual vivían estaba perpetuamente al lado opuesto de ambos. Esto es evidentemente incompatible con que el Sol fuera el fuego central.

La hipótesis del fuego central y de la contraTierra se hicieron pronto insostenibles. Los navegantes habían ya empezado a darse a la vela fuera del Mediterráneo para explorar las costas del sur de África y las del norte de Europa. Pronto viajarían alrededor de las costas de Britania y a los mares helados de más allá. Vieron muchos espectáculos extraños, pero ninguno que pudiera indicar la existencia o de un fuego central o de una contra-Tierra, de suerte que, por fin, faltando toda confirmación, aquellas hipótesis cayeron en olvido y con ellas cayeron también las partes más valiosas de la enseñanza pitagórica.

La fe general de los pitagóricos en la importancia total de los números en el esquema de la naturaleza los condujo a imaginar que las distancias de los diferentes planetas al fuego central debía de estar en la relación de números enteros y de esta suerte debían de corresponder a los más armoniosos intervalos en la escala musical. Por esta causa decían que "el conjunto de los cielos es armonía y número", y creían que los planetas producían música, inaudible para nosotros, a medida que se movían en sus órbitas (la "armonía de las esferas").

Anaxágoras. Anaxágoras de Clazomene (488-428 a. C.) era un hombre rico que descuidaba su hacienda para dedicarse devotamente a la astronomía, diciendo que el objeto de haber nacido es "investigar el Sol, la Luna y el firmamento", y que, por último, sufrió sinsabores por sus opiniones racionalistas. Descubrió la causa de las fases de la Luna, sosteniendo, según nos di-

ce Aecio, que los oscurecimientos de la Luna, de mes en mes, resultan de que va siguiendo al Sol que la ilumina, en tanto que sus eclipses ocurren siempre que cae dentro de la sombra de la Tierra. Plutarco decía que "Anaxágoras fue el primero que puso por escrito, con más claridad y más audacia que hombre alguno, la explicación de la iluminación y la oscuridad de la Luna".

Cleomedes, matemático griego que escribió en el siglo II o III a. C., nos dice que esta explicación no escapó a la crítica.[25] Se dijo que se produjeron eclipses cuando ambos, el Sol y la Luna, estaban visibles sobre el horizonte, y se pensó que esto rebatía la explicación de Anaxágoras.[26]

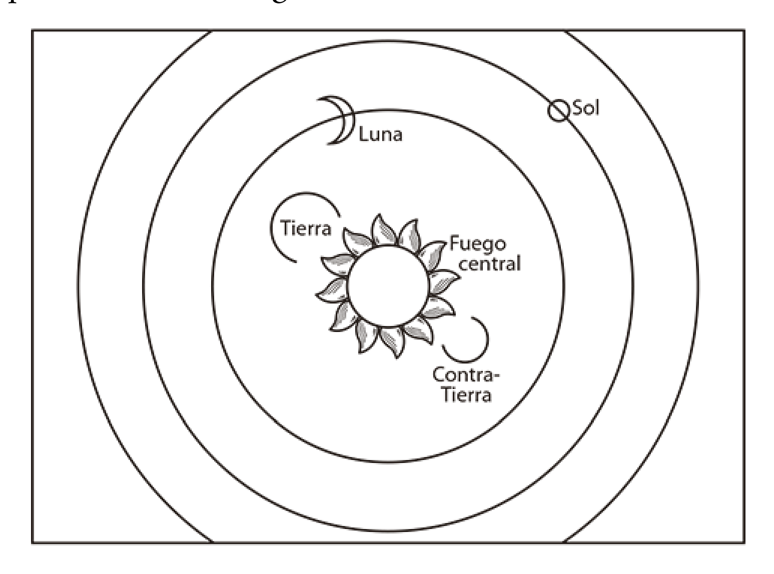


FIGURA II.13.

Manifestaba éste otras opiniones racionalistas y materialistas, rehusando ver ninguna cosa maravillosa o divina en la pompa de los cielos, y sosteniendo que los cuerpos celestes eran de la misma naturaleza general que la Tierra, excepto en que aquéllos se habían hecho incandescentes por el movimiento de rotación. Creía que el Sol era una vasta masa de metal incandescente, más grande que el Peloponeso, en tanto que la Lu-

na tenía valles y montañas como los de la Tierra. Suponía que el universo había "comenzado como una masa caótica en la cual todas las cosas estaban entremezcladas". En este caos se engendró un torbellino que se extendía en círculos cada vez mayores, de suerte que el aire, las nubes, el agua, la tierra y las piedras se separaron sucesivamente como resultado del movimiento circular, y lo más pesado permaneció cerca del centro. Finalmente, "a consecuencia de la violencia del movimiento giratorio, el ígneo éter que todo lo rodeaba desgarró las piedras, las lanzó afuera de la Tierra y las inflamó en estrellas", cosmogonía que tiene mucho en común con la posterior *Hipótesis nebular* de Laplace (p. 277). Anaxágoras pensaba que, además del nuestro, se habían engendrado de igual manera otros mundos, que estaban habitados por hombres como nosotros, que tenían ciudades y campos cultivados como los nuestros, e igualmente sus propios soles y lunas.

Estas doctrinas explicaban muchas cosas, pero cuando Anaxágoras las expuso en Atenas no fueron del agrado popular. Plutarco nos dice que el libro de Anaxágoras fue muy poco estimado; "circulaba en secreto, lo leían muy pocos y fue acogido con cautela". Ya hemos dado noticia de cómo lo recibió Platón. Por último, los atenienses decidieron perseguir a Anaxágoras por impiedad y ateísmo; estaba tratando de derribar sus dioses, útiles y amigables seres, en general, a quienes ellos acudían pidiendo ayuda y favor, los cuales eran susceptibles a sus súplicas e incluso a sus sobornos. Arato[27] escribe (p. 23) lo siguiente:

> En cada situación necesitamos a Zeus. Somos incluso sus criaturas; él, en su bondad para el hombre, señala las cosas de buen agüero, despierta las gentes para el trabajo recordando a sus espíritus las necesidades de la vida diaria, les dice cuándo el suelo está mejor para el trabajo del buey y del azadón, y cuándo las estaciones son propicias para plantar árboles y toda clase de simientes [...][28]

El griego medio se resistía a entregar tan amistosos dioses a cambio de masas inanimadas de tierra y metal.

Otros, más iluminados, no encontraban satisfactorias estas tropas pomposas de dioses antropomórficos, y, como decía Jenófanes, "buscando se encuentra con el tiempo lo que es mejor: un dios único, el más grande entre los dioses y los hombres, que no se parece a los mortales ni en forma ni en pensamiento, sino que todo lo ve, todo lo oye y todo lo piensa. Sin trabajo influye en todas las cosas por el pensar de su espíritu y mora siempre en su propio lugar, absolutamente inmóvil". Pero aquéllos tampoco gustaban aceptar una interpretación racionalista de los fenómenos del firmamento. Como Plutarco escribió:

> En aquellos días se negaban a tolerar a los filósofos de la naturaleza y contempladores de estrellas, como los llamaban entonces, los cuales pretendían hacer pedazos la divinidad con causas irrazonables, fuerzas ciegas y propiedades innecesarias. Por esta causa se desterró a Protágoras y a Anaxágoras se le puso en prisión, gracias a que Pericles, con dificultad, consiguió salvarle la vida.

Existe alguna duda respecto de lo que verdaderamente le sucedió a Anaxágoras. Por un lado, se dice que fue condenado y desterrado de Atenas y que sólo la intervención de Pericles le salvó la vida, mientras que, por otro, se dice que fue absuelto, pero que, sin embargo, encontró prudente dejar Atenas y volver a su tierra nativa, Jonia. En cualquier caso está claro que el tiempo para el pensamiento humano racionalista no había llegado aún. En su lugar comenzó entre la religión y la ciencia un conflicto que duraría edades; la religión había declarado la guerra e iniciado aquella persecución de la ciencia que, por desgracia, se repetiría tan a menudo y figuraría tan ampliamente en la historia de ambas. En Anaxágoras vemos el conflicto en su primitiva, su más simple y su más cruda forma, y su misma simplicidad y lejanía en el tiempo lo hace particularmente fácil de comprender.

Platón. La astronomía, como la física, sufrió entonces la influencia de la posición reaccionaria de Platón y de Aristóteles. Las creencias científicas de Platón no estaban basadas en la observación ni en el conocimiento, sino simplemente en sus opi-

niones personales acerca de lo que fuera más apropiado. El universo, pensaba, debe haber sido formado para satisfacer las necesidades y los deseos humanos. Dios debe ser bueno y, por consiguiente, debe haber construido el más perfecto de todos los mundos posibles para que vivamos en él. Como la más perfecta de todas las formas es la esfera, Él debe haber hecho el universo esférico. De igual manera, como la curva más perfecta es la circunferencia, debe haber hecho que los planetas tengan movimiento circular. Siendo el movimiento de origen divino, tiene que ser perfecto en su regularidad; por esta causa fue gran perturbación para Platón que no pudiera percibirse ninguna perfecta regularidad en los movimientos planetarios; dícese que instó a todos los observadores serios a tratar de descubrir qué serie de movimientos uniformes y ordenados se podrían tener en cuenta en los movimientos notados en los planetas.[29]

A lo largo de casi toda su vida consideró Platón como cierto que la Tierra está en el centro del universo; mas parece que llegó a dudar de esto en sus últimos años, cuando, según Plutarco, "lamentó haber dado a la Tierra el punto central del universo, para lo que no era apropiada". La consideración del supuesto fuego central le hacía entonces "mirar la Tierra como situada en cualquier otra parte menos en el centro, y pensaba que el lugar central y principalísimo pertenece a algún cuerpo de más categoría". Pero continuó inquebrantable en su creencia de que el plan del universo podía descubrirse por principios generales mejor que por la observación, y su único diálogo científico, el *Timeo,* el más flojo de todos ellos, trata de descubrir el plan por medio de la suposición completamente gratuita de que la estructura es como la del hombre; el macrocosmos, piensa, tiene que parecerse al microcosmos.

No obstante, sabemos, también por Plutarco, que su interés por la astronomía la redimió del reproche de ateísmo, y la convirtió en respetable tema de estudio: "Por medio de la brillante

reputación de Platón desapareció el reproche a los estudios astronómicos, y a todos se ofreció el acceso a ellos. Se debió esto al respeto que infundía su vida, y porque subordinó las leyes naturales a la autoridad de los principios divinos".

Aristóteles. La actitud general de Aristóteles era semejante. Su capacidad de observación, que tuvo tan buen éxito en biología, le falló tan completamente en astronomía como en física. Igual que Platón, intentó deducir el plan del universo de principios generales más que del conocimiento, y pensó que debió necesariamente ser modelado sobre las figuras perfectas de la esfera y del círculo. Veía el universo como un sistema de esferas concéntricas, siendo la Tierra el centro común de todas ellas. Exterior a la esfera que es la Tierra, venía la esfera del océano; más allá de éste, la esfera de la atmósfera, y exterior a ésta la esfera del fuego. De esta suerte había esferas de los cuatro elementos; sucesivamente: tierra, agua, aire y fuego. Más allá de la esfera del fuego seguían otras esferas que contenían la Luna, el Sol y los cinco planetas conocidos; y, finalmente, exterior a todo, la esfera de las estrellas fijas. Al contrario de las enseñanzas de los atomistas, Aristóteles enseñó que debe estar continuamente actuando alguna fuerza impulsora para mantener en sus movimientos las varias esferas y los planetas fijados en ellas, y por esta causa defendió la existencia de otra esfera, externa a todas las demás, que proveía de la fuerza impulsora necesaria: el primer motor, al cual identificaba Aristóteles con Dios mismo. Éste es el que hace que todas las estrellas y los planetas se muevan en sus varias esferas con rapidez uniforme "como la amada mueve al amante".

Pero Aristóteles fue extremadamente tolerante, y comprendía bien que se podían defender otros puntos de vista: "Si los que estudian este asunto forman cualquier opinión contraria a lo que hemos afirmado, realmente debemos respetar a ambas

partes, mas debemos al mismo tiempo guiarnos por la más segura”.

En su *Meteorologica* supone que “el volumen de la Tierra es infinitesimal en comparación con el total del universo”, y continúa diciendo que “es absurdo considerar el universo en proceso de cambio, porque en la Tierra se produzcan tan pequeños e insignificantes cambios cuando el tamaño y volumen de la Tierra son seguramente como nada comparados con el conjunto del universo”. Hace también una razonada defensa de la doctrina del fuego central; pero constituye un ejemplo típico de llegar a conclusiones falsas por medio de argumentos sacados de principios anticientíficos y sin base. Después de tomar nota del punto de vista pitagórico de que “en el centro está el fuego, y que la Tierra es una de las estrellas” (esto es, planetas), continúa del modo siguiente: “Otros muchos pueden convenir en que no deberíamos asignar el lugar central a la Tierra, mirando a la confirmación de la teoría más que a la observación de los hechos”, siendo la teoría que, así como el fuego es más honorable que la tierra, merece también, y debe haberlo obtenido, el más honroso lugar. “Argumentando según tales premisas, piensan que no es la Tierra la que ocupa el centro de la esfera, sino el fuego” (p. 75).

Eudoxio. Dejando aquella contracorriente y volviendo a la corriente principal de pensamiento astronómico, el primer astrónomo de nota que encontramos es otro pitagórico, Eudoxio de Cnido (409-356 a. C.). Fue un buen observador e hizo muy exactas observaciones de los movimientos de los planetas.

Hemos visto cómo Platón había propuesto el problema de hallar la serie de los movimientos circulares, uniformes y ordenados que habría que considerar para dar como producto los movimientos observados en los planetas. Los esfuerzos de Eudoxio para resolver este problema lo llevaron a proponer una cosmología que era en muchos aspectos retrógrada. Sus prede-

cesores pitagóricos ya habían determinado que la Tierra se mueve en el espacio igual que los demás planetas; Eudoxio no sólo volvió a situarla en el centro de todas las cosas, sino que la hizo quedar allí inmóvil. Alrededor de aquel centro fijo suponía que giraba un cierto número de esferas. La exterior a todas ellas era sencillamente aquella en la cual Aristóteles colocaba las estrellas fijas; en las esferas interiores no había estrellas ni planetas fijados directamente, sino otras esferas, a las cuales habían adheridas otras esferas, y así sucesivamente. A las finales esferas de esta serie estaban adheridos el Sol, la Luna y los cinco planetas, los cuales, de esta suerte, giraban alrededor de la Tierra central de manera sumamente complicada. Para acomodar sus observaciones, Eudoxio encontró que necesitaba tres esferas para el Sol y tres para la Luna, y cuatro para cada uno de los planetas, haciendo un total de 27 esferas. Después, las más exactas observaciones de su discípulo Calipo demostraron que no era número adecuado 27 esferas; entonces se necesitaron 34. Aquí tenemos el germen del complicado sistema de ciclos y epiciclos que, bajo la autoridad de Ptolomeo, había de dominar y atormentar la astronomía de los 2 000 años siguientes.

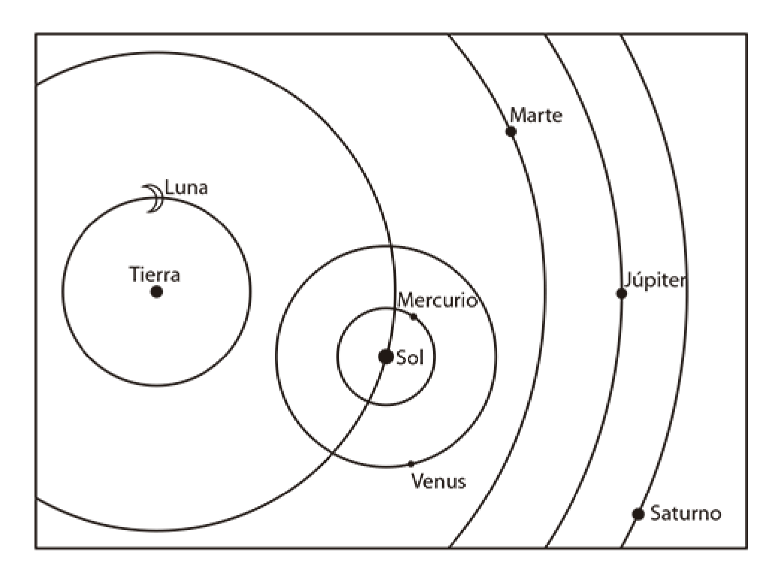


FIGURA II.14.

Durante aquel tiempo hubo exploradores que continuaron sus viajes de exploración por la superficie de la Tierra y se informaron de cómo variaba la duración de los días de unos a otros lugares, dependiendo estas variaciones de la latitud, pero no de la longitud. Se supuso que esto indicaba que la Tierra era de forma esférica. Finalmente, Ecfanto, uno de los últimos pitagóricos, afirmó que esta esfera giraba sobre su eje.

Hacia el año 350 a. C., Heráclides de Ponto (388-315 a. C.) enseñó análogas doctrinas, así como también que en tanto que el Sol y los planetas mayores tenían movimiento de revolución alrededor de la Tierra inmóvil, Venus y Mercurio tenían su movimiento de revolución alrededor del Sol móvil: anticipación del esquema que Tycho Brahe expuso 1 900 años después.

Gracias a Ecfanto y a Heráclides, en la astronomía ya entonces penetró la idea de una Tierra tan poco fija que podía girar bajo un dosel de estrellas fijas, y de unos planetas que podían girar alrededor del Sol.

III
LA CIENCIA EN ALEJANDRÍA
(332 a. C.-642 d. C.)

Los tres siglos que acabamos de examinar formaban una especie de "edad de oro" intelectual en la cual hizo la ciencia más progresos que en los tres milenios de Babilonia y de Egipto. Pero, a medida que este periodo se aproximaba a su fin, se produjo un cambio, y hacia la mitad del siglo IV a. C. la cultura griega había empezado definitivamente a declinar, y con ella la ciencia griega. Pocos años después, esta decadencia se aceleró por la invasión y conquista del país por Alejandro Magno. No obstante, los acontecimientos que parecían ser desastrosos en aquel momento para la ciencia pueden acaso haber sido una buena fortuna disfrazada.

Porque Alejandro decidió entonces celebrar sus victorias y consolidar su imperio mediante la construcción de una nueva capital que habría de ser la más magnífica ciudad del mundo. Eligió un emplazamiento en las llanuras por donde el Nilo desemboca en el mar, y llamó a la todavía nonata ciudad Alejandría, derivada de su mismo nombre.

Murió en el año 323 a. C., aún incompleto su grandioso proyecto, y su reino fue dividido entre todos cuantos pudieron poner manos en él. Egipto cayó en suerte a uno de sus generales, Ptolomeo, quien eligió como su capital la todavía no terminada Alejandría y, más ambicioso aún que Alejandro, aspiró a hacerla capital del mundo, no sólo en lo que respecta al gobierno y al comercio, sino igualmente a la cultura y la inteligencia. Con este fin eligió un lugar contiguo a su palacio y en este lugar empezó a construir un *Museum* o Templo de las Musas, que era

aproximadamente equivalente a una universidad moderna. Tal fue el origen de la ciudad que hubo de remplazar a Atenas como capital cultural del mundo mediterráneo, de la universidad que había de ser el hogar de la ciencia durante los mil años siguientes. Estos mil años constituyen el asunto del presente capítulo.

Hacia 300 a. C. la universidad estaba ya lista para ser ocupada, y Ptolomeo procedió a formar el Cuerpo Directivo con los más eminentes sabios de aquel tiempo; muchos acudieron desde Atenas, y al hacerlo así llevaron la antorcha del saber un paso atrás de Occidente a Oriente. Cuando Ptolomeo murió en el año 285 a. C., su sucesor, Ptolomeo II, no menos ardoroso en hacer de Alejandría el centro cultural del mundo, fundó la famosa biblioteca que se incluyó en el número de las siete maravillas del mundo. Estaba dividida en cuatro departamentos de literatura, matemáticas, astronomía y medicina, cada uno con su propio bibliotecario o guardián, y se dice que había acumulado no menos de 400 000 manuscritos en los primeros 40 años de su existencia.

La fortuna sonreía o se mostraba ceñuda alternativamente con la ciencia en aquella su nueva casa. Al principio hubo una serie de éxitos brillantes, en parte por la ayuda oficial de la dinastía reinante, en parte también por un cambio de método que acompañó al traslado de Grecia a Egipto, cambio que provino, como veremos, de pasar de la soñadora especulación sobre el universo en general a precisos estudios de problemas bien definidos.

Llegó entonces un tiempo en que la ciencia empezó de nuevo a marchitarse (el periodo de marasmo inmediato anterior a la era cristiana). El espíritu de progreso parecía haber desertado de la ciencia, en parte porque muchos asuntos de investigación parecían haberse agotado, y nada nuevo se encontró para

remplazarlos; los descubrimientos entonces dieron lugar a comentarios, críticas y revisión de los triunfos pasados.

Las influencias del exterior también fueron menos favorables. Después de gobernar Egipto durante unos 300 años, la dinastía de los Ptolomeos vino a su término el año 30 a. C., con la muerte de Cleopatra, cuando los romanos derrotaron a las tropas egipcias y se apoderaron de la administración de Egipto. Los romanos fueron grandes soldados, grandes administradores y legisladores, grandes ingenieros y mecánicos de un sentido práctico inimaginable, pero simpatizaban poco con la ciencia; su mundo era el de los negocios, y no el del pensamiento abstracto. A consecuencia de esto, la caída de Alejandría bajo el poder romano pudo muy bien haber resultado desastrosa para la ciencia y, no obstante, el resultado no fue malo. Mostrando su acostumbrada tolerancia hacia las razas sometidas, los romanos permitieron que la lengua griega y una atmósfera general griega prevalecieran en Alejandría, a consecuencia de lo cual pronto la vida reanudó su curso normal, y la universidad, otra vez llena de estudiantes, pasó nuevamente a ser un centro de instrucción y de investigación.

El peligro real vino más tarde y de lado muy diferente. El cristianismo, habiendo comenzado en el más humilde de los orígenes, conquistó el mundo mediterráneo de modo más completo que jamás lo hicieran las legiones romanas. Los conquistadores romanos habían introducido una nueva técnica de gobierno, pero los conquistadores cristianos trajeron consigo una nueva técnica de vida y una concepción revolucionaria de las aspiraciones y destino del hombre; hoy nos es difícil comprender la intensidad de su impulso revolucionario. Su ciudadanía estaba en los cielos; su vida terrenal era únicamente una preparación para una vida futura en otros lugares, de suerte que veían el mundo material como una cárcel y la bóveda de los cielos únicamente como un velo; ambos eran transitorios y to-

talmente insignificantes en comparación con lo que hay en el más allá. Durante la vida de algunos de ellos, un día vendría en el cual las estrellas caerían del cielo y el firmamento se arrollaría como un rollo de pergamino para dejar al descubierto la visión de un juez sentado en su trono.

> Entonces, Dios, que Jesús había dicho que era el Padre amoroso, cambiaría su carácter y volvería a la ferocidad y tiranía de sus hábitos del Antiguo Testamento: incluso el mismo Jesús, que orando había dicho una vez: "Padre, perdónalos", dejaría entonces a un lado la merced y ejercería justicia y venganza; los pecadores, a quienes en otro tiempo consideraba como ovejas descarriadas de su rebaño, ahora se hundirían en los infiernos para sufrir entre llamas y tormentos sin fin; espectáculo a propósito para aumentar la bienaventuranza del cielo.[1]

Acerca de esto, Tertuliano escribió: "Cómo me admiraré yo, cómo me reiré, cómo me regocijaré, cómo me alegraré cuando contemple [...] a tantos sabios filósofos sonrojarse dentro de las rojas llamas con sus engañados discípulos". ¿Para qué iba a servir al hombre en este último día de ira haber invertido laboriosos años examinando cómo estaban hechos los barrotes de su cárcel, o estudiando el velo celeste que entonces habrá ya desaparecido? ¿No hubiera sido mejor que se preparara para el juicio final?

Con tales creencias difícilmente podrían los cristianos simpatizar con el estudio de la ciencia, especialmente siendo muchos de ellos estrechamente fanáticos; su religión era su todo y, diferente al paganismo que estaba suplantando, no sabía nada respecto de tolerancia o magnanimidad para los que sustentaban otras opiniones. Al principio todo esto importaba poco, porque los cristianos eran pocos y carecían de influencia. Incluso a principios del siglo IV sólo era cristiana una pequeña parte de la población;[2] los escritores paganos escasamente mencionaban su existencia e incluso los grandes moralistas, como Séneca y Marco Aurelio, no hablaron de ellos o lo hicieron con desprecio.

Llegó entonces el año 312, un hito o mojón en la historia del hombre, cuando Constantino el Grande, hijo ilegítimo de un oficial romano y una mesonera servia, que había sido elegido emperador de Roma por el ejército en campaña, abrazó súbitamente la religión cristiana.[3] En el año 390 fue prohibida la religión pagana por edicto circulado por todo el imperio, y en lo sucesivo el cristianismo reinó supremo, excepto en los lugares del imperio apartados de los caminos donde los sencillos aldeanos se reunían todavía para cantar himnos y ofrecer sacrificios modestos a los dioses de sus antepasados.

Veinte años después, Roma fue tomada por Alarico y sus bárbaros, y cuando éstos también abrazaron la fe cristiana, la "edad tenebrosa" cubrió Europa; edad en que el sacerdocio dominó todo el pensamiento humano y la mayor parte de las actividades humanas; edad la cual

> probablemente sería considerada en todas las virtudes intelectuales inferior a cualquier otro periodo en la historia de la humanidad. A una intolerancia sin límites para toda divergencia de opinión se le unía una igual ilimitada tolerancia de toda falsedad y de todo deliberado fraude que pudiera favorecer las opiniones recibidas. Enseñada la credulidad como una virtud, y dictadas todas las conclusiones por autoridad, la inteligencia humana se sumergió en un letargo mortal que durante varios siglos suspendió su acción.[4]

En el presente capítulo nos ocuparemos de describir los azares de la ciencia desde el tiempo de su decadencia en Grecia y su resurgimiento en Alejandría hasta el momento aquel en que la inteligencia humana fue sumida en mortal letargo, periodo que comprende aproximadamente mil años.

La escena tendrá lugar casi exclusivamente en Alejandría; porque a pesar de las varias desventajosas influencias en actividad, Alejandría se había constituido de manera tan firme como centro cultural del mundo que casi todos los grandes hombres de ciencia del próximo milenio o enseñaban o estudiaban allí, y a veces ambas cosas. El espíritu científico se ejercitó principalmente en las dos actividades de la matemática y de la astrono-

mía. Los matemáticos alejandrinos cuentan con algunos de los más grandes que el mundo ha tenido: Euclides, Arquímedes y Apolonio. Exactamente igual ocurrió en la astronomía, con los nombres prestigiosos de Aristarco, Eratóstenes, Hiparco y Ptolomeo. Examinemos ahora la ciencia alejandrina en detalle, comenzando con la matemática.

Las matemáticas en Alejandría

Euclides. El primero de los grandes matemáticos alejandrinos, Euclides, nació hacia el año 330 a. C., probablemente de padres griegos,[5] y falleció hacia el 275 a. C. No sabemos dónde se educó; mas algunos creen que se puede indicar Atenas, tanto por sus escritos como por su conocimiento de las obras de Platón. Llegó a ser guardián y bibliotecario del departamento de matemáticas de la Biblioteca de Alejandría, e igualmente allí dio sus enseñanzas.

La más famosa, sin disputa, de sus obras es la llamada *Elementos de geometría,* la cual señaló la manera en que había de enseñarse la geometría en nuestras escuelas hasta muy recientemente. No sabemos qué propósitos estaba designado a servir aquel libro: ¿libro de texto para estudiantes, o compendio de conocimiento geométrico, o sabio esfuerzo para demostrar que los hechos que presenta la geometría son verdades inevitables que pueden deducirse de axiomas de indiscutible validez? En la actualidad sirve perfectamente a estos tres propósitos, como acaso se pretendió conseguir; pero es el último el que más nos interesa en el día de hoy.

Porque el geómetra moderno no cree que los axiomas [postulados] sean verdades indiscutibles. Acepta que, si fueran ciertos, las proposiciones se deducirían como asunto de lógica pura. Pero mira los postulados, especialmente el famoso postula-

do duodécimo,[6] como especificando propiedades del espacio. Tiene que tratar con muchos géneros de espacio, pero hay uno solamente (el *espacio euclidiano,* como él lo llama) en el cual el postulado duodécimo es verdad universal. En este espacio, pero no en otro, los teoremas de Euclides, como el famoso teorema de Pitágoras, son invariablemente verdad. Las propiedades de otros géneros de espacio se especifican con más facilidad determinando la manera y extensión en que en ellos no se cumple el teorema de Pitágoras. Todo esto se ha introducido últimamente en el campo de la ciencia práctica, porque la teoría de la relatividad (p. 388) describe el mundo como existiendo en un espacio en el cual no son ciertos de manera general, los postulados de Euclides.

La obra *Elementos de geometría* consiste en un coherente tratado de 12 libros en el cual se deduce una sucesión de proposiciones por estricta lógica de los postulados hace un momento mencionados, a los cuales se añade un libro XIII de singularidades desconectadas, que forma un apéndice. Es muy posible, como señaló una vez de Morgan, que el libro en total fuera producto de la vejez de Euclides, cuya muerte le impidiera ponerlo en forma definitiva. Es verdaderamente una recopilación. Muchas de sus proposiciones aparecen en una primitiva *Historia de las matemáticas* que escribió Eudemo cuando Euclides tenía sólo unos 10 años de edad, en tanto que algo de su contenido era ciertamente conocido por los pitagóricos, como, por ejemplo, el teorema de que $\sqrt{2}$ es inconmensurable, que Euclides presenta dos veces (*Elementos,* libro X, proposiciones 9 y 117). Muchas de las demostraciones de Euclides son pesadas, excesivamente prolongadas y evidentes; pero otras son muy ingeniosas. He aquí un ejemplo.

Sabemos que los números pueden dividirse en dos clases: números compuestos y números primos; siendo número compuesto el que es igual al producto de varios factores menores,

como, por ejemplo, 6 (que es igual a 2 × 3) y 8 (que es igual a 2 × 2 × 2), mientras que un número es primo cuando no puede ser descompuesto en factores, como, por ejemplo, 5 o 7. Si examinamos los primeros seis números que siguen al número 1, encontramos que dos tercios de ellos son primos, a saber: 2, 3, 5 y 7. Si examinamos 12 números en lugar de seis, la proporción de números primos desciende a la mitad, siendo primos 2, 3, 5, 7, 11 y 13. Si tomamos 24 números, decrece hasta las tres octavas partes; con 48 números se reduce a $^{5}/_{16}$; con 96 números se reduce a una cuarta parte, y así sucesivamente. Cuanto más avanzamos se hace más pequeña la proporción, siendo la razón de esto que van apareciendo continuamente nuevos divisores. Surge ahora la siguiente cuestión: si avanzamos suficientemente lejos, ¿negaremos alguna vez un valor en el cual ninguno de los números sea un número primo? O, dicho de otra manera, ¿hay un máximo número primo más allá del cual no existen ya números primos? Esto parece ser un problema terriblemente intrincado; si el lector no lo piensa así, trate de resolverlo antes de seguir adelante la lectura. Y, no obstante, Euclides lo resuelve con la sencilla observación de que si hubiera un número primo mayor que todos, el número *N,* entonces el número (1 × 2 × 3 × 5… × *N*) + 1 sería a la vez número primo y no-primo, o compuesto, lo cual es absurdo. Tendría que ser no-primo porque es mayor que *N,* y hemos supuesto que éste era el mayor número primo. Pero tenía que ser también número primo, porque ningún número primo puede ser factor suyo, puesto que su división por cualquiera de los números primos, 1, 2, 3,…, *N* deja siempre 1 como residuo. Por consiguiente, la hipótesis de que *N* es el mayor número primo conduce a conclusiones contradictorias y, por consecuencia, no puede haber un número primo mayor que todos.

Además de sus *Elementos,* Euclides escribió otros cuatro libros sobre geometría, aparte de libros de astronomía, música y

óptica, de los cuales sólo ha sobrevivido el último. En éste presenta las leyes de la reflexión de la luz con toda exactitud; las leyes de la refracción no eran aún conocidas. Pero Euclides tuvo opiniones erróneas acerca de la naturaleza de la luz. Habían enseñado los pitagóricos que la luz se propagaba desde un objeto luminoso hasta el ojo del observador en forma de partículas (anticipación de la teoría corpuscular de Newton y de la teoría cuántica de la luz de nuestros días [p. 381]). Había enseñado Empédocles que la luz es una especie de perturbación que se propagaba al través de un medio, empleando tiempo en su viaje; anticipación de las teorías ondulatorias de los siglos XVIII y XIX (p. 294) y de la concepción de hoy. Platón y otros habían imaginado, completamente errados, que la luz consistía en rayos que se propagan en línea recta desde la mirada del observador hasta chocar con un objeto, que entonces ve aquél. Cuando buscamos un objeto, pensaban, lo buscamos con estos rayos, de igual manera que palpamos en busca de algo en la oscuridad. Euclides acepta esta última alternativa, razonando que la luz no puede venir del objeto al ojo, puesto que si así lo hiciera, "no dejaríamos de percibir una aguja en el pavimento, como frecuentemente nos ocurre".

Arquímedes. El más grande de todos los matemáticos alejandrinos, y el mejor conocido después de Euclides, fue Arquímedes (287-212 a. C.). Después de haber estudiado en Alejandría, volvió a su país natal, Sicilia, donde, por último, fue muerto por los romanos en Siracusa, cuando tomaron la ciudad, después de un sitio de tres años. Lo mismo que Pitágoras y Platón, defendía que la instrucción debía ser adquirida por razón de sí misma y no para conseguir ganancias ni para sus aplicaciones prácticas; mas como su vida transcurrió en tiempos de guerra, su gran ingenio tuvo que dedicarlo principalmente a fines militares. Se dice de él que incendió por medio de espejos y lentes convergentes los barcos que estaban sitiando Siracusa (narra-

ción de la que muchos dudan)[7] y que inventó catapultas que apartaban a los sitiadores de las murallas de la ciudad. Entre sus invenciones más pacíficas estaba el *tornillo de Arquímedes,* un dispositivo para elevar el agua que estuvo en uso en Egipto hasta tiempos muy recientes, y una combinación de rueda dentada y torno para la botadura de navíos. Pero se lo conoce más por su método de medir el peso específico de las sustancias. Ponía un peso conocido de la sustancia dentro de una vasija totalmente llena de agua y pesaba el agua que se derramaba por los bordes. Si, por ejemplo, metía 12 libras en la vasija, y encontraba que se había vertido una libra de agua, sabía que la masa de aquella sustancia pesaba 12 veces el volumen del agua derramada, de suerte que el peso específico que buscaba era 12. Es muy conocido lo que se cuenta de que comprobó de esta manera el fraude de un orfebre que había sustituido parte del oro que le dieron para hacer una corona. Se añade que imaginó aquel método cuando estaba en el baño y que salió corriendo por las calles gritando εὕρηκα, εὕρηκα.

Su obra en matemáticas fue de inmenso alcance y variedad. Muchas de las fórmulas comunes en geometría se le atribuyen: π^2 para el área del círculo (siendo π la relación de la circunferencia al diámetro), $4\pi r^2$ y $^4/_3\pi r^3$ para la superficie y el volumen de una esfera, y las correspondientes fórmulas para conos y pirámides.[8]

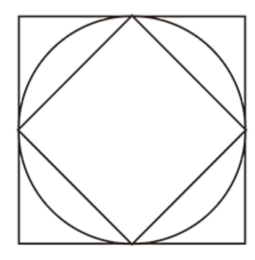


FIGURA III.1.

Arquímedes consiguió también una gran aproximación al valor π empleando lo que era conocido como "método de

exhauciones". El cuadrado más pequeño que puede contener un círculo (es decir el cuadrado circunscrito a un círculo) de radio r tiene de área $4r^2$, en tanto que el mayor cuadrado que puede encerrar un círculo (cuadrado inscrito) tiene de área $2r^2$ (fig. III.1.). Entonces, el área del círculo debe estar comprendida entre $2r^2$ y $4r^2$. Si construimos hexágonos regulares en lugar de cuadrados, encontraríamos límites más próximos $2.598r^2$ y $3.464r^2$, en tanto que con octágonos se habrían conseguido límites más aproximados aún: $2.828r^2$ y $3.314r^2$. Cuantos más lados tenga el polígono más se aproximarán al círculo y más aproximados serán los límites conseguidos. Con polígonos de 96 lados se encuentran los límites de $3.1395r^2$ y $3.1426r^2$, y en consecuencia el valor de π se halla entre 3.1395 y 3.1426. Arquímedes empleó un polígono de 96 lados, pero introdujo ciertas aproximaciones numéricas[9] que lo llevaron al resultado de que π debe estar comprendido entre $3^{10}/_{71}$ (esto es 3.1408) y $3^{10}/_{70}$ (es decir 3.1429). El verdadero valor es, como se sabe, 3.1416.

Arquímedes escribió asimismo un cierto número de pequeños tratados sobre diferentes temas, como los principios de la palanca y de la polea, sobre las espirales (especialmente la bien conocida *espiral de Arquímedes*), sobre el área de la parábola, sobre aritmética y así sucesivamente. La mayor parte se han perdido, pero los dos ejemplos siguientes de su aritmética que han sobrevivido tienen interés, porque demuestran la altura que alcanzó.

Los griegos seguían todavía usando letras para significar números, y existía en uso una variedad de sistemas. En Alejandría representaban los números del uno al nueve por las nueve primeras letras del alfabeto griego (desde la α a la ι); las decenas, desde 10 a 90 por nueve letras más, y las centenas, desde 100 a 900 por otras nueve letras.[10] Todos los números desde 1 a 999

se podían representar con esta notación y números más avanzados, hasta 99 999 999, añadiendo índices y subíndices. Pero la tosquedad de este sistema hacía difícil anotarlos y operar con ellos, incluso para números pequeños, a la vez que no había ni aun notación para números muy grandes. Arquímedes propuso emplear éstos tomando 100 000 000 como una nueva unidad, y que el cuadrado, el cubo, etc., de este número fueran considerados como unidades adicionales de segundo orden, de tercer orden y así sucesivamente. Si representamos, como en la matemática moderna, a la unidad seguida de *n* ceros con la notación 10^n, entonces lo que propuso Arquímedes era tomar a 10^8 como su primera nueva unidad, siendo las otras sucesivas 10^{16}, 10^{24}, 10^{32}, y así sucesivamente, exactamente igual que nosotros tomamos un millón como una especie de unidad, y de esta manera hablamos de billones, trillones, cuatrillones y lo mismo en adelante. Para ejemplo de las posibilidades de su propuesto sistema, calculó el número de granos de arena que serían necesarios para llenar el universo. Suponiendo que dentro de una esfera de radio igual a $1/80$ del ancho de un dedo caben 10 000 granos de arena, y que el diámetro del universo es menor que diez mil millones de estadios (aproximadamente 1 609 310 000 kilómetros, lo cual es sólo un poco mayor que el diámetro de la órbita de Júpiter), calculó que el número que buscaba era inferior a 10^{63}.[11] Tenemos aquí el prototipo del género de cálculos que figuran tan extensamente en la astronomía moderna.

Arquímedes determinó que las diferentes unidades 10^8, 10^{16}, 10^{24}, entre otras, forman lo que ahora se describe como una progresión geométrica y hace la fertilísima observación de que el producto de las *m* ésimas y *n* ésimas unidades es igual a la (*m*+*n*) ésima unidad; o, en lenguaje moderno, que $x^m \times x^n = x^{m+n}$. Tenemos aquí la primera afirmación conocida de la ley de los exponentes, de cuyo germen surgió el cálculo logarítmico 2 000 años después.

El segundo ejemplo es de tipo muy diferente. Propuso Arquímedes el siguiente problema como desafío a los matemáticos de Alejandría: “el Sol tenía una ganadería de diferentes colores: manchados, blancos, zainos y castaños. El número de toros manchados era inferior al número de toros blancos en $^1/_2$ + $^1/_3$ veces el número de toros zainos e inferior al número de toros zainos en $^1/_4$ + $^1/_5$ veces el número de toros castaños, e inferior al número de toros castaños en $^1/_6$ + $^1/_7$ veces el número de toros blancos. Por otra parte, el número de vacas blancas era $^1/_3$ + $^1/_4$ veces el número total de ganado zaino (toros y vacas en total), mientras el número de vacas zainas era $^1/_4$ + $^1/_5$ veces el número de ganado castaño, el número de vacas castañas era $^1/_5$ + $^1/_6$ veces el número de ganado manchado, y el número de vacas manchadas era $^1/_6$ + $^1/_7$ veces el número de ganado blanco. ¿Cuántos toros y vacas había de cada color?”

Nosotros podemos pensarlo fácilmente escribiendo estos datos en un sistema de ecuaciones de primer grado, el cual, aunque complicado, no será difícil de resolver; pero tales métodos no eran conocidos por Arquímedes y, en todo caso, el método aritmético está muy lejos de ser sencillo. No hay, desde luego, una solución única, puesto que los datos determinan únicamente las proporciones y no la cuantía absoluta de la manada. Arquímedes dio la solución siguiente:

manchados: 331 950 960 toros y 435 137 040 vacas;

blancos: 829 318 560 toros y 576 528 800 vacas;

zainos: 596 841 120 toros y 389 459 680 vacas;

castaños: 448 644 800 toros y 281 265 600 vacas;

en los cuales todos los números son múltiplos de 80, de suerte que la solución más sencilla se obtiene dividiendo todos por 80. Es casi inconcebible que Arquímedes pudiera haber manejado números de tal magnitud con los medios del tosco sistema

de numeración entonces en uso, de tal suerte que pudo haber conseguido sus resultados mediante algún otro sistema privado y luego haberlo traducido al sistema común para anunciarlo al mundo. El ejemplo que hemos presentado antes de éste induce a pensar que pudo incluso haber empleado un sistema nada diferente del nuestro de hoy.

Arquímedes fue sin duda el más grande de los matemáticos griegos, y hubiérase mostrado aún más grande si los accidentes de guerra no hubieran restringido sus actividades y acortado su vida. Cuando los romanos finalmente tomaron Siracusa, la soldadesca recibió orden de respetar su vida y su casa; pero, bien fuera por accidente, bien fuera por designio deliberado, no se cumplió. Los conquistadores romanos le erigieron una tumba espléndida sobre la cual se grabó un diagrama formado por un cilindro circunscrito a una esfera para conmemorar la manera por cuyo medio calculó el área de una superficie esférica. Su propio deseo había sido que lo enterraran en una tumba como ésta.

Herón de Alejandría. Desde Arquímedes se dirigen nuestros pensamientos naturalmente a Herón, otro matemático alejandrino. La fecha de su vida es incierta; pero ocurrió probablemente un siglo, posiblemente varios, después de Arquímedes.[12] Poseyó en gran parte el mismo género de ingenio mecánico que Arquímedes, aunque en grado inferior, y desplegó la misma elegante maestría matemática. Pero Arquímedes fue matemático por inclinación suya, y mecánico e inventor sólo por necesidad, en tanto que en Herón parece que ambas actividades se produjeron a la inversa. Inventó un gran número de artificios mágicos y de juguetes mecánicos, siendo uno de los más dignos de notar una máquina de vapor. El vapor era producido por ebullición del agua, y pasaba a un tubo que podía girar alrededor de un eje. De este tubo salían cuatro pitones al aire exterior, todos encorvados de manera que al salir por ellos el vapor

el tubo giraba por reacción (a la manera de un aeroplano de propulsión a chorro). He aquí el primer ejemplo conocido del empleo de la presión del vapor para transformar la energía química del combustible ardiendo en energía de movimiento, principio en que se funda la máquina de vapor actual. También se dice que Herón había inventado una máquina automática que funcionaba al echársele una moneda por una ranura, la primera que recuerda la historia.

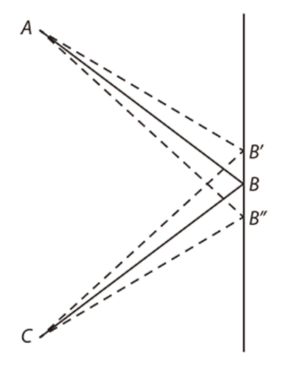


FIGURA III.2.

En lo abstracto hizo Herón algún buen trabajo matemático, siendo de especial interés sus estudios de óptica. Euclides había declarado que cuando la luz se refleja en una superficie lisa, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Herón demostró que esa ley puede expresarse en forma alternativa diciendo que la luz sigue el camino más corto desde un punto a otro bajo la condición de encontrar el espejo en algún punto de propagación. De esta manera, si *ABC,* en la figura III.2., es el verdadero camino, éste es más corto que *AB′C* o que *AB″*2*C,* o cualquier otro camino semejante. No parece que Herón haya concedido ninguna importancia especial a este resultado, y poco sospechaba que de hecho estaba introduciendo un principio nuevo y de gran alcance que habría de desarrollarse en uno de los más importantes entre todos los métodos de matemáticas.

Apolonio. Hemos visto que introdujo Menecmo las secciones cónicas en las matemáticas, pero que no hizo gran uso de ellas. Euclides y Arquímedes también trabajaron sobre las curvas; pero la mayor parte de sus escritos se han perdido. Vino luego Apolonio (260-200 a. C.), matemático que había estudiado en Alejandría durante muchos años y probablemente también enseñó allí, a infundir nueva vida en el estudio. Brevemente dicho, hizo para las secciones cónicas lo que había hecho Euclides respecto del círculo 100 años antes, escribiendo un tratado que abarcaba tanto que habían de pasar siglos antes de que se hiciera ninguna adición sustancial a este tema. Contenía alrededor de 400 proposiciones, y estaba dividido en ocho libros: conocemos perfectamente bien su contenido porque de aquellos ocho libros siete existen todavía, cuatro en el texto griego original y tres más traducidos al árabe. Aparte de esto, poseemos comentarios sobre la obra entera hechos por Papo (siglo iv d. C.) y Eutocio (siglo vi d. C.).

Menecmo había imaginado las varias secciones cónicas que podían obtenerse de secciones que estuvieran siempre en ángulo recto con la superficie cónica, y encontró que se originaban tres diferentes curvas en superficies cónicas cuyos ángulos fueran respectivamente menor, mayor e igual a un ángulo recto.

Apolonio demostró entonces que las tres curvas pueden obtenerse en una superficie cónica de cualquier ángulo, cortando las secciones en ángulos diferentes. Nosotros mismos podemos ver esto lanzando la luz de una linterna eléctrica ordinaria sobre el pavimento o sobre la pared. La linterna emite un simple cono de luz invariable, y vemos las diferentes secciones del cono enviando la luz sobre el pavimento en ángulos diferentes. Si ponemos la linterna verticalmente apuntando hacia abajo, veremos un círculo de luz en el pavimento, lo que demuestra que la curva producida por la sección es una circunferencia. Mas, si inclinamos la linterna de suerte que forme un pequeño

ángulo con la vertical, la parte iluminada se alarga, y la curva producida por la sección es una elipse (o circunferencia alargada). Si hacemos girar la linterna hasta que se ponga horizontal, la curva producida por la sección es una parábola. Si giramos la linterna todavía un poco más de suerte que apunte ligeramente hacia arriba, la curva de la sección se convierte en hipérbola. Es costumbre pensar en el cono suponiendo que se extiende en ambas direcciones desde su vértice, representación que no podemos reproducir con nuestra linterna eléctrica. Cuando pensamos que el cono es de esta manera, la hipérbola consiste en dos curvas separadas como en la figura II.12. (p. 53).

Apolonio también dio sus actuales nombres a las secciones cónicas: *parábola,* que significa "la aplicación"; *elipse,* "la deficiencia", e *hipérbola,* "el exceso".

Las secciones cónicas han cobrado ahora una importancia especial a causa de su frecuencia en la naturaleza; pero los griegos no sabían nada de esto, imaginando que los movimientos más naturales deben ser necesariamente circulares. Esta idea tuvo que abandonarse cuando Kepler encontró, en 1609, que los planetas se mueven en secciones cónicas, y cuando Newton demostró, en 1687, que tenían que hacerlo de esta manera si sus movimientos estaban determinados por la atracción gravitatoria del Sol. Las secciones cónicas se hicieron aún más importantes cuando los físicos modernos empezaron a describir el átomo como partículas electrizadas moviéndose alrededor de centros de atracción en secciones cónicas.

En tanto que estas curvas se han hecho importantes, el método griego de estudiarlas ha caído en desuso. El método consistía en construir una cadena de proposiciones, cada una de ellas deducida en estricta lógica de las que la precedían (como hizo Euclides en sus *Elementos*), formando de este modo un compendio de los resultados. Pero tal compendio ha llegado ahora a ser tan inútil como lo ha llegado igualmente a ser el

compendio de resultados aritméticos que Ahmes transcribió en su papiro, ahora que los métodos modernos de operar con números proporcionan un modo abreviado casi sin esfuerzo para cualquier resultado que podamos necesitar en cualquier momento. Los métodos puramente geométricos de Menecmo, Euclides y Apolonio se han sustituido análogamente por lo que se conoce como *geometría analítica*. Se dice corrientemente que ésta fue invención de Descartes (1596-1650) y Fermat (1601-1665), y será explicado cuando lleguemos a tratar de su época; mas probablemente se empleó mucho antes de la época de éstos, y muy posiblemente incluso por Apolonio. Sus métodos son incomparablemente más directos, más poderosos y más seguros que los métodos de tanteo de la geometría griega.

Estos últimos métodos habían alcanzado su límite natural con Apolonio, de suerte que la geometría quedó casi estancada durante la gran calma científica que anunció la era cristiana y durante varios siglos después. En la segunda mitad del siglo IV d. C., con Papo de Alejandría apareció un geómetra de sobresaliente capacidad; pero tuvo la mala fortuna de haber nacido fuera de su tiempo, cuando el interés por la geometría ya había muerto. La única obra suya que se conserva, Συναγωγή (la *Colección*), es un compendio de sabiduría matemática, y es de interés porque describe el contenido de otros libros que se han perdido después de aquella época. Los matemáticos asocian aún el nombre de Papo con un problema que propuso en este libro, pero que resolvió sólo parcialmente; helo aquí: hallar el camino que sigue un punto que se mueve de manera que el producto de sus distancias a un número de líneas sea siempre proporcional al producto de sus distancias a otro número de líneas. Euclides y Apolonio habían resuelto ciertamente casos sencillos de este problema, y Descartes lo resolvió en su forma general (p. 175); se ha dicho que ha sido esto lo que lo llevó a la invención de la geometría analítica.

Diofanto. Hacia la misma época de Papo nos encontramos con otro gran matemático alejandrino: Diofanto, al cual corrientemente se le atribuye la introducción de los métodos algebraicos en la matemática, y fue sin duda el primero de los escritores conocidos que hicieron uso sistemático de símbolos. Los empleó para denotar potencias, igualdad, signo negativo, y así sucesivamente, aunque bien pudiera ser que otros, cuyos libros se han perdido, puedan haberlo hecho antes que aquél.

Ya hemos dado noticia de cómo Euclides demostró teoremas de geometría que eran equivalentes a fórmulas algebraicas, siendo la razón de establecerlos en forma geométrica el que los griegos de su tiempo consideraban las cantidades en términos de longitudes y de áreas. Tomando un ejemplo bien conocido: Euclides presentó el teorema de que

$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

en forma geométrica, diciendo que "el cuadrado construido sobre *AB* (fig. III.3.) es igual a la suma de los cuadrados construidos sobre *AC* y *CB,* más los dos rectángulos de lados *AC* y *CB*". Hasta la época de Diofanto no fue usual enunciar teoremas que no admitieran interpretación geométrica. La ciencia de la cantidad estaba aprisionada con grilletes geométricos, hasta que Diofanto vino a romper estos grilletes y la dejó libre.[13]

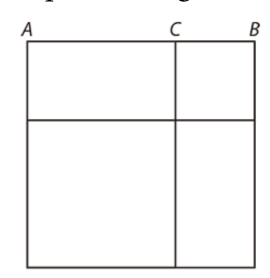


Figura III.3.

Diofanto empleó sus nuevos métodos algebraicos para resolver ecuaciones de primero y segundo grados, esto es, ecuaciones lineales y cuadráticas de las formas:

$$ax + b = 0 \text{ y } ax^2 + bx + c = 0,$$

y es de interés saber que empleó los mismos métodos que se enseñan en nuestras escuelas de hoy. También resolvió unas pocas sencillas ecuaciones simultáneas, y la sencillísima ecuación de tercer grado $x^3 + x = 4x^2 + 4$.

La astronomía en Alejandría

En los mil años que estamos ahora examinando encontramos cuatro astrónomos verdaderamente grandes, cuyos nombres están asociados a Alejandría: Aristarco, Eratóstenes, Hiparco y Ptolomeo. El primero es célebre porque dio la primera descripción exacta de la disposición del sistema solar —los planetas, incluyendo la Tierra, girando en movimiento de traslación alrededor de un sol central—, en tanto que el último es también digno de tenerlo presente por haber dado una descripción que, aunque totalmente errónea, prevaleció, indiscutida, hasta el siglo XVI d. C.

Aristarco de Samos (310-230 a. C.). Sabemos muy poco de la vida de Aristarco. Fue algunas veces citado como el Matemático, pero Vitruvio habla de él como uno de los pocos grandes hombres que poseyeron profundo conocimiento por igual de todas las ramas de la ciencia: geometría, astronomía, música, etc. Nació en Samos y fue discípulo de Estratón, el cual, como uno de los primitivos peripatéticos, había probablemente estado en contacto estrecho con Aristóteles. Estratón había tratado de explicar todas las cosas siguiendo líneas racionales, de suerte que no es sorprendente que Aristarco se enfrentara con los problemas de astronomía desde un punto de vista semejante.

Fue el primero que trató las observaciones astronómicas con verdadero espíritu científico, y que de éstas hizo deducciones por métodos estrictamente matemáticos. En una obra que aún

se conserva, *Sobre los tamaños y distancias del Sol y de la Luna,* intenta calcular estos tamaños y distancias por pura deducción de la observación.

Hemos visto cómo Anaxágoras (p. 77) había dado la explicación exacta de las fases de la Luna. Como el Sol y la Luna se mueven en el firmamento, la parte de la superficie de la Luna iluminada por el Sol cambia continuamente. En el momento en que está iluminada justamente la mitad, el ángulo *TLS* de la figura III.4. debe ser exactamente un ángulo recto. Si Aristarco hubiera medido el ángulo *LTS* en tal momento, habría conocido la forma del triángulo *LTS,* y de esta manera hubiera podido calcular las distancias relativas del Sol y de la Luna.

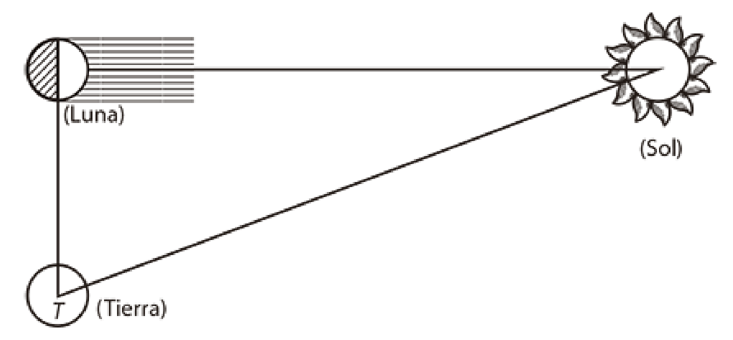


FIGURA III.4.

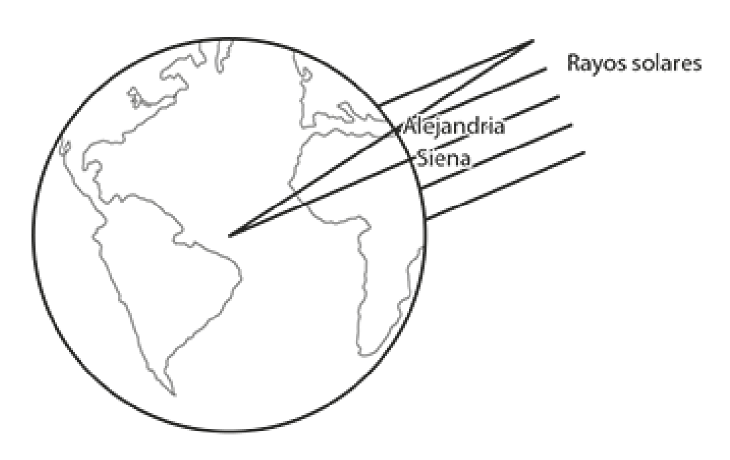


FIGURA III.5.

Tal fue su ingenioso y seguro método. Pero el momento de la media Luna exacta es difícil de precisar, y Aristarco estimó que el ángulo *LTS* era solamente de 87° en aquel momento, siendo así que su verdadero valor es de 89° 51′. El error era más grave que lo que a primera vista parece, porque el resultado final del cálculo gira en pequeñas diferencias entre este ángulo y 90°. Aristarco las estimó en 20 veces su verdadero valor y llegó a la conclusión de que el Sol está aproximadamente 19 veces más distante que la Luna, cuando la cifra verdadera es exactamente 20 veces mayor. No obstante, este cálculo, por inexacto que fuera, atrajo la atención hacia la desigualdad de las distancias del Sol y la Luna. Demostró al mismo tiempo que el Sol y la Luna tienen que ser de tamaños muy diferentes. Veían sus tamaños como iguales en el firmamento, como puede comprobarse fácilmente en un eclipse, de suerte que sus verdaderos tamaños tienen que ser proporcionales a sus distancias: relación que Aristarco había determinado.

Quedaba solamente determinar el verdadero tamaño del Sol y de la Luna, y éstos podían determinarse por el tamaño de la sombra que la Tierra lanza sobre la Luna en un eclipse; como el Sol está tan distante, la sombra de la Tierra debe ser casi igual a la Tierra que produce la sombra. Aristarco estimó que el diámetro de la sombra era aproximadamente siete veces el de la Luna, y concluyó en que la Tierra debe tener unas siete veces el diámetro de la Luna, aunque la cifra verdadera, como sabemos, es aproximadamente cuatro. Mas, por inexacta que fuera esta estimación, demostraba que el Sol debe ser muchas veces más grande que la Tierra.

Nada sabemos de cuál fuera el proceso de su razonamiento en este descubrimiento; mas podemos imaginarlo pensando en la radical improbabilidad de que el Sol girara alrededor de una Tierra que era muchísimo más pequeña que aquél. Filolao había ya propuesto destronar a la Tierra de su supuesta posición

central, haciéndola girar en movimiento de rotación con los demás planetas alrededor de un nuevo centro, el "fuego central" del universo, mientras que Heráclides había enseñado que los dos planetas Mercurio y Venus giraban alrededor de un centro que no era otro que el Sol. ¿Por qué no pudo Aristarco haber pensado en cambiar aquellas dos opiniones y suponer que todos los planetas, incluyendo la Tierra, giraban alrededor del Sol?

Probablemente vio Aristarco que si la Tierra se movía de esta manera, su movimiento ocasionaría que las estrellas fijas cambiaron continuamente sus direcciones vistas desde la Tierra, de suerte que la apariencia del firmamento debía cambiar constantemente. Y, sin embargo, no se percibió tal cambio, y pudo creer que esto significaba únicamente que las estrellas están tan remotas que el movimiento de la Tierra alrededor del Sol no produce cambio apreciable en sus posiciones aparentes. En todo caso, Arquímedes escribió algunos años más tarde que Aristarco emitió la hipótesis de "que las estrellas fijas y el Sol permanecen inmóviles; que la Tierra gira alrededor del Sol siguiendo la circunferencia de un círculo, estando el Sol en el centro de la órbita; y que la esfera de las estrellas fijas situada alrededor del mismo centro que el Sol es tan grande [que la órbita de la Tierra] está en la misma proporción a la esfera de las estrellas fijas que el centro de una esfera lo está respecto de su superficie".[14]

Abandonando los acostumbrados métodos griegos de especulación y confianza en los supuestos principios generales, Aristarco había conseguido, casi de un salto, la comprensión exacta de la disposición del sistema solar; había adquirido ideas ciertas sobre el relativo minúsculo tamaño de la Tierra, su manifiesta escasa importancia como mero apéndice de un Sol mucho más vasto, y de la insignificancia de ambos en la vastedad del espacio.

De esta manera tomó la astronomía por primera vez su verdadera ruta, lo que nos llevaría a esperar que el resto de la narración fuera la del rápido progreso en el camino científico. De hecho las cosas ocurrieron de muy diferente modo. Nos dice Plutarco que las doctrinas de Aristarco se admitieron con plena confianza, e incluso las defendió con ardor Seleuco de Babilonia en el siglo II a. C.; pero, aparte de este aislado partidario, sabemos sólo de lo poco que se les defendió hasta la época de Copérnico y de Galileo.

La verdad parece ser que tales doctrinas no eran aceptables tanto para los ignorantes como para los cultos, sencillamente porque eran demasiado avanzadas para su tiempo. El sólido, vigoroso, carente de imaginación "sentido analítico" del hombre medio decía a éste que era absurdo imaginar que una cosa tan grande como la Tierra podía ser únicamente un diminuto fragmento del universo, y todavía más absurdo imaginar que una cosa tan voluminosa y sólida pudiera estar en movimiento; y, si lo estuviera, ¡por favor!, ¿qué es lo que podría producir las fuerzas inmensas que, de acuerdo con las ideas mecánicas de aquel tiempo, se necesitarían para ponerla en movimiento?

Por otra parte, podemos imaginar al hombre medio sintiendo resistencia a renunciar a su confortable sentimiento de consecuencia como habitante de la parte más importante del universo, o como cercano vecino de los dioses. Y por tal causa, Cleantes propuso que Aristarco fuera acusado de impiedad, como lo había sido Anaxágoras dos siglos antes, y una vez más la intolerancia religiosa contribuyó a apartar el pensamiento de la verdad. La astronomía fue devuelta esencialmente al lugar en que la había dejado Eudoxio, e ideas en general análogas a las de Eudoxio moldearon la astronomía durante los 2 000 años venideros.

Eratóstenes (276-195 a. C.) fue el principal conservador de la biblioteca de Alejandría, y no solamente tuvo la reputación de ser el hombre más instruido de la Antigüedad, sino que fue casi igualmente famoso por sus proezas atléticas. Escribió sobre muchos asuntos, pero es más conocido por sus medidas de las dimensiones de la Tierra. El principio en que se fundó era extremadamente sencillo, y no era nuevo.

Creía que en el mediodía de un día de verano el Sol estaba exactamente encima de Siena (la moderna Asuán), de suerte que el fondo de un pozo estaba iluminado directamente por los rayos del Sol, y halló, midiéndolo, que el Sol en el mismo momento en Alejandría estaba bajo el cenit la $^1/_{50}$ parte de una circunferencia entera (7° 12′). Creía que Asuán estaba al sur de Alejandría, y concluyó diciendo que la superficie de la Tierra en Asuán formaba un ángulo igual a $^1/_{50}$ de una circunferencia completa con la superficie de la Tierra en Alejandría, de donde se deduce que la circunferencia de la Tierra debía ser 50 veces la distancia desde Siena a Alejandría. Estimando que esta distancia última es de 5 000 estadios, Eratóstenes dio en conclusión que la circunferencia de la Tierra era de 250 000 estadios. Arquímedes nos dice que aquélla había sido anteriormente estimada en 300 000 estadios.

Parece que Eratóstenes hubo de corregir posteriormente su estimación y la dejó en 252 000 estadios. No sabemos cuál era la exacta longitud del estadio egipcio; pero si aceptamos que probablemente su longitud era de 517 pies, la circunferencia viene a ser aproximadamente de 24 650, frente a un valor verdadero de 24 875 millas. Mas parece que Eratóstenes hizo sus medidas solamente en números redondos, de suerte que en gran parte se puede atribuir la seguridad de su resultado final a simple buena suerte.[15]

Se dice también que Eratóstenes había medido la *oblicuidad de la eclíptica,* esto es, la inclinación del eje de rotación de la

Tierra que es causa de las estaciones, y obtuvo el valor de $^{11}/_{116}$ de una circunferencia completa, es decir 23° 51′, en tanto que el verdadero valor en aquel tiempo era alrededor de 23″ 46′.

Hiparco. La siguiente gran figura que encontramos es Hiparco de Nicea (190-120 a. C.). Desde la época de Aristarco en adelante, muchos astrónomos habían anotado las posiciones de las estrellas más brillantes en relación con ciertos puntos de referencia en el firmamento. Hiparco construyó un observatorio en Rodas, e hizo medidas análogas. La razón que tuvo para ello era que hacia el año 134 a. C. había hallado que la brillante estrella la Espiga había cambiado su posición en unos 2° en los 160 años anteriores, y esto había aconsejado la necesidad de una nueva lista más exacta de las posiciones de las estrellas, de acuerdo con lo cual hizo una lista de aproximadamente 1 000 estrellas, número de las que se pueden ver con facilidad en Egipto, y procedió a medir sus posiciones con toda la seguridad que pudo conseguir.

Después comparó esta lista de estrellas con las anotadas en tiempo de Aristarco, y también con algunas anotaciones muy anteriores de Babilonia. Pudo tener la esperanza de encontrar acá y allá que alguna individual estrella había cambiado su posición en el firmamento; lo que en verdad encontró fue una sistemática serie de cambios que indicaban que el eje de la Tierra había cambiado su dirección en el espacio; aquél no apuntaba siempre al mismo punto del firmamento. Repitiendo lo mismo dicho en la p. 17, la Tierra no gira como un peón cuando está derecho en plena rotación, sino que se bambolea, como un peón que "muere". Este fenómeno es conocido como *la precesión de los equinoccios,* y su descubrimiento se atribuye generalmente a Hiparco, aunque también se reclama en favor del babilonio Kidenas, con cuya obra estuvo familiarizado Hiparco. Estimó éste que el eje de la Tierra se movía describiendo un ángulo de unos 45″ cada año, pero el verdadero valor es de 50,2″

aproximadamente, de suerte que el "peón"-Tierra requiere unos 25 800 años para completar una vuelta de balanceo y volver a su orientación original. Muy largo tiempo es; pero no enormemente largo en comparación con el tiempo histórico, de manera que dentro de la historia humana el eje de la Tierra debe de haber apuntado a direcciones sustancialmente diferentes de la del día de hoy. Hemos visto cómo puede utilizarse este conocimiento para fechar el nombre de las constelaciones, y de manera análoga, si no conociéramos la fecha de la vida de Hiparco, la hubiéramos deducido de las posiciones que asignaba a las estrellas.

Estudió también los movimientos del Sol, de la Luna y de los planetas a través del firmamento, y obtuvo resultados muy exactos dando la longitud del mes lunar con error menor que un segundo, y la del año solar con un error de sólo seis minutos. En realidad, hizo buenas mediciones de la mayor parte de las magnitudes fundamentales en astronomía, y haciéndolo así asentó la astronomía cuantitativa sobre una base exacta y racional. Intentó determinar una disposición de las órbitas planetarias que tendría en cuenta los movimientos de los planetas que se hubieran observado a través del firmamento. La mayor parte de sus escritos se han perdido; mas, probablemente, su esquema era muy semejante al que posteriormente expuso Ptolomeo en su *Almagesto,* aunque quizás menos acabado en su forma (p. 114).

En general se le atribuye la invención de la trigonometría, aunque sus escritos referentes a esa cuestión se han perdido todos. Se dice de él que había construido lo que ahora llamamos una tabla de senos naturales,[16] y se cree que descubrió el teorema (generalmente conocido como teorema de Ptolomeo) que expresamos en la forma siguiente:

$$\text{sen}(A + B) = \text{sen}A \cos B + \cos A\, \text{sen}B,$$

y contiene virtualmente el conjunto de la trigonometría elemental.

Se dice que Hiparco también había conocido cómo "resolver" triángulos esféricos; esto es, calcular todos los ángulos y lados de un triángulo trazado sobre una esfera, tal como la superficie de la Tierra, cuando se conocen tres de sus seis elementos. Esto podría, por ejemplo, dar los medios al navegante astrónomo de calcular la distancia entre dos puntos cuya latitud y longitud son conocidas. Incidentalmente, el plan para especificar la posición de un lugar en la superficie de la Tierra tuvo origen en Eratóstenes, pero el plan correspondiente al firmamento lo tuvo en Hiparco.

Hiparco murió hacia el año 120 a. C., y después de él no apareció ningún astrónomo de importancia por espacio de más de dos siglos. En astronomía, como respecto de otros objetos de estudio, la era cristiana abrió un periodo de estancamiento científico.

Ptolomeo. El primer astrónomo de importancia que nos encontramos al otro lado del abismo es Claudio Ptolomeo, el cual no se sabe que haya estado en modo alguno emparentado con la casa reinante del mismo nombre. Enseñó e hizo observaciones en Alejandría desde, aproximadamente, el año 127 al 151 d. C. y se cree que murió hacia el 168. Su obra más conocida, el *Almagesto,*[17] hizo para la astronomía lo que habían hecho para la geometría los *Elementos* de Euclides, y continuó como el libro modelo sobre este asunto hasta el siglo xvii. Igual que los *Elementos* consiste en 13 libros, y contiene mucha matemática y astronomía. Es original algo de su contenido, pero gran parte está evidentemente tomado de anteriores autores, especialmente de Hiparco.

El libro I, que es un tratado de trigonometría, es digno de notar porque contiene una tabla de senos naturales.[18] El valor

de π lo da como $3^{17}/_{120}$, es decir 3.14167, el cual compara con otros valores del modo siguiente:

Límites asignados por Arquímedes

$$3\frac{10}{70} = 3 + \frac{1}{7} = 3.14286$$

$$3\frac{10}{71} = 3 + \frac{1}{7\frac{1}{10}} = 3.14084$$

Valor dado por Ptolomeo:

$$3\frac{17}{120} = 3 + \frac{1}{7\frac{1}{17}} = 3.14167$$

Aproximación posterior:

$$3\frac{16}{113} = 3 + \frac{1}{7\frac{1}{16}} = 3.1415929$$

Valor exacto:

3.1415927.

Otros dos libros contienen la posición de 1 022 estrellas, en tanto que otros tratan de la teoría de los movimientos planetarios. Ésta, que era la parte más famosa de las obras de Ptolomeo, puso definitivamente la Tierra en el centro del universo. Eudoxio y Calipo habían imaginado que los planetas estaban adheridos a un complicado sistema de esferas móviles; Ptolomeo remplazó aquellas esferas por un sistema moviéndose en círculos, cuya disposición general se muestra en la figura III.6.

En este plan el Sol y la Luna giran alrededor de la Tierra en órbitas circulares; pero los movimientos de los otros planetas son más complicados. Más allá de la órbita del Sol hay otra órbita circular en la que no se mueve nada material: únicamente una abstracción matemática conocida como el *Marte ficticio*. Mientras éste se mueve siguiendo la circunferencia, el verdadero Marte se mueve en una circunferencia más pequeña alrededor del Marte ficticio. La gran circunferencia en que se mueve

el Marte ficticio se llama la *deferente de Marte,* en tanto que la circunferencia más pequeña, en que se mueve el Marte real, se llama el *epiciclo de Marte,* puesto que es una circunferencia superpuesta sobre otra. En algunas etapas de este movimiento, Marte va moviéndose en su epiciclo en la misma dirección en que se mueve el Marte ficticio en su deferente; entonces los movimientos en el epiciclo y en la deferente se refuerzan y aparece Marte moviéndose muy rápidamente a través del firmamento. Pero en otras etapas, cuando el movimiento en el epiciclo es en cualquier otra dirección, aparece Marte moviéndose menos rápidamente; algunas veces, el movimiento en el epiciclo será en dirección exactamente opuesta a la dirección en la deferente, y entonces aparecerá Marte moviéndose hacia atrás. Todo esto va de acuerdo con las observaciones del movimiento de Marte; ordinariamente se mueve a través del firmamento en la misma dirección que el Sol y la Luna; pero a veces aparece vacilante en su movimiento, y circunstancialmente se mueve, durante un corto tiempo, en la dirección opuesta.

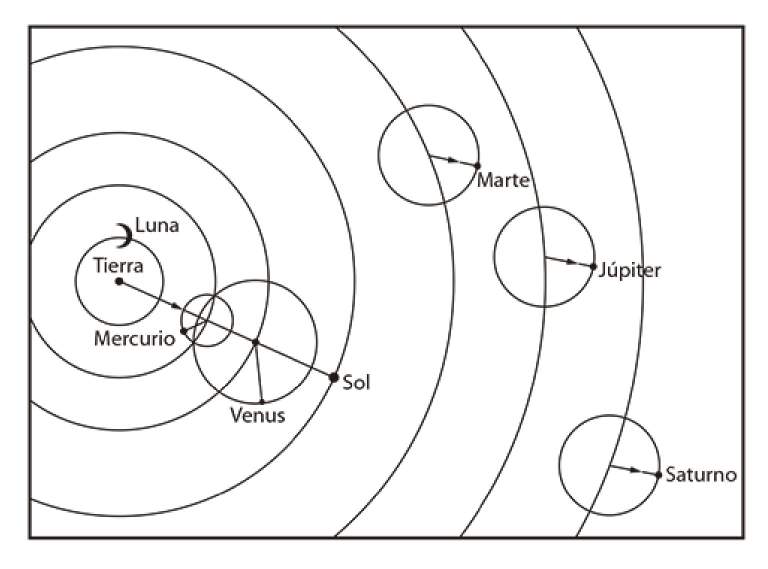


FIGURA III.6.

Todavía más lejos de la Tierra, propuso Ptolomeo análogas disposiciones de deferentes y epiciclos para Júpiter y Saturno. Había también deferentes y epiciclos para Mercurio y Venus, pero éstos eran de carácter muy diferente, de manera que estuvieran de acuerdo con la diferente calidad de movimientos de estos dos planetas. Porque, en tanto que Marte, Júpiter y Saturno, en conjunto, marchaban siempre constantemente a oriente del Sol, Mercurio y Venus oscilaban alrededor del Sol sin moverse nunca lejos de éste. Ptolomeo explicó esto suponiendo que las circunferencias deferentes de Mercurio y de Venus están entre la Tierra y la órbita del Sol, y que los planetas ficticios de esta suerte se movían en sus deferentes, que están situadas siempre exactamente entre la Tierra y el Sol. Esto hacía que los verdaderos planetas aparecieran en sus epiciclos como si se movieran alrededor del Sol. Pero esto fue un invento muy artificioso, y parece extraño que Ptolomeo no pensara hacer coincidir las deferentes de Mercurio y de Venus con la órbita del Sol, como había hecho Heráclides de Ponto; se dice incluso que hasta los antiguos egipcios creían que estos planetas giraban directamente alrededor del Sol.

Como representación de lo que ciertamente ocurre, el esquema de Ptolomeo era, naturalmente, erróneo hasta la exageración, y, no obstante, en la época en que fue propuesto, como observó alguna vez Morgan, puede haber sido más útil que la verdad. Porque a los hombres, en los movimientos de los planetas, les importaba más lo aparente que lo real, y el esquema que propuso aquél proporcionó una descripción de ellos que era aproximada a la verdad y la podían entender. Si Ptolomeo se hubiera anticipado a Einstein y hubiera dicho que la marcha de los planetas era geodésica en un espacio de cuatro dimensiones, su afirmación habría carecido de valor por ininteligible. Lo mismo podía haber sucedido si se hubiera anticipado a Kepler afirmando que los planetas se mueven describiendo elipses al-

rededor del Sol y trazando áreas iguales en tiempos iguales. A cada generación se le debe exponer la verdad en términos de sus conceptos familiares. Aristarco fracasó en su intento de convencer porque era demasiado adelantado para su época; probablemente Ptolomeo, con visión menos penetrante que su gran predecesor, tuvo éxito porque estuvo más próximo al nivel del pensamiento contemporáneo.

Ptolomeo escribió asimismo un tratado sobre óptica en cinco tomos, la mayor parte de los cuales sobreviven en una traducción del siglo XII del árabe al latín. En el último de estos cinco tomos hace un estudio de los efectos astronómicos de la refracción de la luz. Sabía que cuando los rayos de luz pasaban de una sustancia a otra, como, por ejemplo, del aire al agua, eran "refractados" o desviados de su transcurso rectilíneo, y vio que los rayos de luz de las estrellas se desviaban al pasar del aire enrarecido en las altas zonas de la atmósfera al aire más denso de las inferiores.[19] Esto hace que una estrella se vea directamente más alta sobre nuestras cabezas que lo que realmente está, de suerte que, por ejemplo, el Sol, la Luna y las estrellas permanecen visibles después de que han pasado realmente bajo el horizonte. Ptolomeo describe los resultados de las experiencias que había hecho sobre la refracción de la luz en el vidrio y en el agua, redactó tablas de refracción y enunció una ley de refracción que es casi exacta cuando el ángulo de refracción es muy pequeño.[20]

Ptolomeo describió dos nuevos instrumentos astronómicos: el astrolabio y el círculo mural, que fueron de gran utilidad, no solamente en su tiempo, sino durante muchos siglos después. También estudió la geografía desde el punto de vista astronómico, explicando los principios del levantamiento de mapas, coincidiendo con Hiparco en que primero hay que hacer las observaciones sobre latitud y longitud. Pero no se halló en situación de poder cumplir con sus propios preceptos, y pudo

únicamente trazar cierto número de mapas poco satisfactorios, uniendo raros fragmentos de informaciones que había recogido de mercaderes y viajeros.

Se le ha atribuido cierto número de otros libros sobre óptica, astrología, acústica y otros temas, pero es dudoso el autor de éstos, y nada contienen que pueda dar a su autor una fama comparable a la que adquirió con su *Almagesto.*

La física y la química en Alejandría

Poco hubo que registrar ni en física ni en química en Alejandría; el principal suceso fue el ascenso y la caída del estudio de la alquimia en el siglo III. La palabra alquimia ahora la asociamos a toda suerte de necedades y fraudes; pero estrictamente hablando, debe simplemente denotar la primera forma de química. Su ejercicio era en Alejandría un monopolio de la casta sacerdotal, y sus secretos se guardaban muy cuidadosamente. Muchos de ellos, sin embargo, están anotados en una colección de papiros del siglo III en la Biblioteca de Leiden. El propósito específico de la alquimia era la transmutación de metales corrientes en metales "nobles", el oro y la plata. Lo que se proponía la alquimia de Alejandría en el siglo III parece haber sido la producción de imitaciones baratas de artículos de oro y plata. Por ejemplo: se puede hacer una masa de liga mezclando una buena cantidad de metal no precioso con un poco de oro; entonces se le da forma y si se le sumerge en una sal mordiente como ahora se hace en el grabado, ésta ataca al metal no precioso, pero deja al otro intacto, y así tenemos un pedazo de metal que no sólo parece oro sino que lo es en realidad… en tanto que nadie explore bajo la superficie. En esto no había verdadero fraude; este procedimiento era casi exactamente una réplica de nuestra electrólisis. La alquimia se practicó en Alejandría

hasta aproximadamente fines del siglo III d. C., cuando el emperador Diocleciano la decretó ilegal y ordenó que se quemaran todos los libros que trataran de ella. En los comienzos fue del género inocente ya descrito; pero más adelante parece que hubo la pretensión de transmutar los metales no preciosos en oro por procedimientos de aquel género.[21]

Final de la escuela de Alejandría

A finales del siglo IV nos encontramos con el astrónomo-matemático Teón, que escribió un comentario sobre el *Almagesto* y dio a la publicidad una nueva edición de los *Elementos* de Euclides, y con su más distinguida hija Hipatia, única mujer de ciencia conocida en la Antigüedad; ella escribió comentarios sobre las cónicas de Apolonio y sobre el álgebra de Diofanto. Hacía ya tiempo que a Alejandría le había abandonado la inspiración de trabajo científico original; todos los pensamientos originales que entonces producía la escuela eran especulaciones filosóficas de tipo místico y soñador[22] y su ocupación principal era editar, comentar y comprobar las glorias de una edad pasada.

La oposición de los cristianos a toda instrucción no cristiana se estaba haciendo entonces formidable; pero la ciencia estaba demasiado moribunda para que fuera muy atractiva. Los cristianos no querían saber nada de la ciencia; su interés, que todo lo absorbía, estaba en la controversia teológica. Sostenían que el defender opiniones teológicas incorrectas era pecado mortal e inventaron increíbles torturas que se infligían unos a otros con una crueldad que el pagano Amiano dijo que no podía ser sobrepasada ni aun por los animales salvajes, y de las que el cristiano san Gregorio dijo que eran "como en el infierno". Pero en tanto que leemos[23] que cortaban orejas, narices, lenguas y manos derechas a los que tenían opiniones diferentes respecto

de si el Hijo era de la misma sustancia que el Padre, o sólo de sustancia semejante, no leemos nada de que nadie sufriera por sus opiniones científicas. No obstante, el cristianismo con su lema "No analices, sino cree" debe de haber aportado grandísimo temor al espíritu científico de libre investigación.

En Alejandría, lo que menos se hacía era instruirse ni tomar en consideración ninguna la ciencia desde el punto de vista de una religión que todo lo dominaba. Su arzobispo Teófilo, el enemigo perpetuo de la paz y de la virtud, un hombre malvado y audaz cuyas manos se manchaban alternativamente de oro y de sangre,[24] tuvo un especial entusiasmo por la exterminación de todos los monumentos de cultura pagana, y en el año 390 fue destruida una gran parte de la Biblioteca, según se cree, por órdenes suyas. Su sobrino, san Cirilo, que le sucedió en el trono arzobispal, se sintió envidioso de la influencia de Hipatia; ella, una pagana, era reputada de poseer tan profundo conocimiento de todas las ciencias que el cristianismo mismo estaba en peligro. De esta suerte, cuando una banda de cristianos, la mayor parte frailes, la asesinaron en el año 415 (arrancando la carne de sus huesos con afiladas conchas de ostras) se sospechó que Cirilo fue el instigador de aquel acto.

Algunos alejandrinos emigraron entonces a Atenas, donde la Academia de Platón conservaba todavía debilitada existencia; pequeña isla de paganismo que gradualmente fue sumergiéndose ante la marea creciente del cristianismo. Aunque se le atribuyeron grandes relaciones con magia y superstición, su profesor de filosofía, Proclo (412-485), fue el más grande filósofo de su tiempo. Había aducido argumentos contra la descripción bíblica de la Creación, y fue amenazado de muerte, a lo cual dio su bien conocida réplica: "Lo que ellos hagan con mi cuerpo, nada importa; cuando yo muera llevaré conmigo mi espíritu". Finalmente, en el año 529, los cristianos persuadieron al emperador Justiniano a que prohibiera el estudio de toda "ins-

trucción pagana” en Atenas, y la escuela de Atenas murió a su vez.

Otros alejandrinos emigraron a Bizancio (Constantinopla), a la cual Constantino había hecho su capital en el año 326, creando lo que virtualmente era una nueva ciudad con el mismo celo y minuciosidad que Alejandro había mostrado en Egipto seis siglos antes, siendo la intención de aquél hacer una capital digna de un Imperio que en lo sucesivo había de ser enteramente cristiano. El resultado fue desastroso. La nueva ciudad “representó una de las formas menos nobles que jamás haya asumido la civilización […] hundida en sensualidad y en los placeres más frívolos, el pueblo sólo salía de su indiferencia cuando alguna sutileza teológica o alguna rivalidad en las carreras de cuadrigas, lo estimulaban frenéticamente”.[25]

La instrucción no podía probablemente florecer con vigor en tal ambiente, pero la ciudad se convirtió en un centro subalterno de la cultura griega en Oriente, y permaneció así hasta que los turcos se apoderaron de ella en 1453. Si durante aquellos 800 años Bizancio añadió muy poco al caudal del saber del mundo, por lo menos actuó como receptáculo de saber estancado, del cual fluían ocasionalmente algunas gotas para fertilizar el pensamiento exterior; creó poco, pero evitó la destrucción de mucho.

Uno de los conflictos teológicos de los bizantinos, realmente, resultó ventajoso para la instrucción. Nestorio, obispo de Bizancio, defendía que la personalidad de Cristo era la fusión de dos distintas naturalezas, una humana y otra divina, y que la Virgen María era la Madre de Cristo hombre, pero no del divino Señor, Jesús; el título de “Madre de Dios” era aborrecible para él. Cuando el primer concilio de Efeso declaró que era una herejía, en el año 431, a los muchos partidarios de Nestorio se les hizo la vida intolerable por la persecución y marcharon hacia oriente, primero a Mesopotamia y desde allí, aguijoneados

por más persecuciones, a Persia. Allí tuvieron completa libertad para ocuparse en literatura y en ciencia, escribiendo obras originales en lengua siria, su propio lenguaje nativo, que había por entonces llegado a ser la lengua común en Asia occidental, y traduciendo las obras de Aristóteles, Platón, Euclides, Arquímedes, Herón, Ptolomeo y otros muchos a la misma lengua, con resultados que veremos más adelante.

El final definitivo de la escuela de Alejandría ocurrió en el año 642, cuando los mahometanos conquistaron la ciudad y destruyeron lo que quedaba de la gran Biblioteca. El califa Omar justificó, según se dice, aquel acto final de vandalismo fundándose en que "si aquellos escritos de los griegos coinciden con el libro de Dios, son inútiles, y no necesitan conservarse; si discrepan, son perniciosos y deben destruirse". Abulfaragio cita que los libros sirvieron de leña para los 4 000 baños de la ciudad durante seis meses;[26] exageración evidente, porque incluso si hubieran quedado en la biblioteca 400 000 tomos, la ración media de combustible por baño habría sido únicamente de cuatro tomos por semana.

IV
LA CIENCIA EN LA EDAD TENEBROSA
(642-1453)

Hemos seguido hasta ahora los azares de la ciencia tal como vino a Europa desde Oriente, primero tropezando en la Grecia jónica y después penetrando hasta Atenas, y varias de las regiones extremas de la Grecia continental y del sur de Italia. Por último, cuando su luz comenzaba a desvanecerse en Grecia, volvió de nuevo hacia el Oriente y halló morada en Alejandría, la ciudad magnífica que Ptolomeo I había hecho construir en la desembocadura del Nilo.

Muchos temas de estudio parecieron trabajar allí hasta su propia extinción. La geometría, que al principio había hecho tan magníficos progresos, vino a total aniquilamiento; el álgebra difícilmente sobrevivió; la física, que tuvo tan feliz comienzo, había sido estrangulada casi al nacer; la astronomía, después de haber logrado el mejor de los comienzos, tomó rumbo equivocado en la época de Aristarco, y continuaba entonces marchando por caminos erróneos.

Lo peor de todo era la oposición de la religión. Hemos visto que los cristianos quemaron gran parte de la enorme Biblioteca en el año 390; en 415 asesinaron a Hipatia y, en el año 642, los mahometanos conquistaron la ciudad, clausuraron la universidad y completaron la destrucción de la Biblioteca. Cada ataque impulsó hacia el exterior parte de la escuela, de suerte que la instrucción y los hombres instruidos se desparramaron por muchas tierras: Grecia, Roma, Bizancio, incluso Persia y el Oriente. Veremos ahora cómo todas aquellas líneas de distribución fueron a reunirse en el gran imperio medieval fundado por los árabes.

Durante siglos ignotos, Arabia había estado habitada por tribus nómadas, de categorías diferentes, desde visionarios y soñadores hasta salvajes asesinos. Su religión había sido un politeísmo primitivo de dioses y demonios de tribu, hasta que las ideas cristianas y judías penetraron viniendo de Bizancio, Abisinia y Persia.

Hacia el año 470 un hijo póstumo, Mahoma, nació y fue educado por un abuelo suyo, hombre rico. Mahoma se hizo hijo del desierto y finalmente se casó con una vieja, pero rica viuda, llamada Kadiga y se hizo conductor de caravanas. A ésta y a sus más próximos parientes y amigos les confió que había tenido una visión, y en ella una revelación de que no había más que un solo Dios, y que él, Mahoma, era su profeta. Cuando declaró esto a más extenso círculo, sólo halló el ridículo y la persecución, y más tarde, en el año 622, se fugó a Medina, donde encontró más simpatía y fundó una fraternidad de la cual surgió y creció la religión que había de convertir a centenares de millones y que predicó una guerra santa.

Los árabes, posiblemente excitados por la visión de una religión mahometana extendida por todo el mundo, empezaron entonces una carrera de conquistas militares. Palestina y el Irak cayeron en su poder en el espacio de pocos años; luego invadieron Siria en el año 636 y Egipto en el 639; tomaron posesión de Alejandría en el año 642. Persia y el Turkestán occidental siguieron, juntamente con parte de la India occidental, de África del Norte, de España y de Europa occidental. Con jadeante rapidez fueron edificando uno de los más grandes imperios que el mundo vio jamás, pero al mismo tiempo, uno de los más inestables, porque en el espacio de cuatro siglos sus glorias desaparecieron y se desvaneció en polvo.

Sus nuevos modos de vida les presentaron panoramas de una cultura más extensa que la del desierto abrasador, y a medida que avanzaban en su camino triunfal, absorbían tanto la

instrucción como el territorio. Su conquista de Egipto les aportó algo del saber que había quedado en el casco vacío de Alejandría; por su conquista de Persia adquirieron algo del saber que fue transportado de Alejandría a Bizancio, y desde allí, avanzando hacia Oriente, por los nestorianos. Verdaderamente hubo un breve periodo durante el cual el centro nestoriano de Gondisapur actuó como una especie de capital cultural para el imperio árabe que surgía como los bongos; pero muy pronto sobrevinieron cambios; Gondisapur tuvo que ceder ante Bagdad, y el árabe remplazó al sirio como lengua de cultura y ciencia. Los industriosos nestorianos se dedicaron entonces a trabajar en retraducir los clásicos griegos al árabe. Aquel acceso de cultura por conquista fue suplementado por un influjo que vino del exterior. Algo vino de Grecia, llevado en su mayor parte por médicos griegos que fueron llamados para tratar a los conquistadores árabes en una variedad de enfermedades desconocidas para ellos en su vida en el desierto. Algo también vino de la India, que consistía principalmente en conocimientos de aritmética traídos por los mercaderes. Hasta entonces, la civilización de los hindúes había contribuido muy poco a la ciencia, posiblemente porque la atmósfera religiosa que todo lo envolvía no había conducido al estudio de las cosas materiales. La vida no era más que el paso a través de sombras de las cuales, por sus pecados, tenía el hombre que presenciar muchas manifestaciones, y de las cuales debía tratar de escapar para siempre por medio de la subyugación de su personalidad. El mundo material parecía tan poco importante como lo había sido para los primeros cristianos, y la ciencia languideció, no por persecución ni intolerancia, porque las religiones orientales daban a la tolerancia la categoría de virtud, sino por hallarse en una atmósfera de completo desinterés. Entonces, cuando el siglo v se aproximaba a su fin, una tribu de arios invadió el país, y la

ciencia comenzó a florecer como jamás antes ni después, hasta el presente gran despertar científico, en la India.

Uno de los más prominentes científicos indios de este primer periodo, Arya-Batha, que nació en Patna en el año 476, se cree que había inventado el álgebra independientemente de Diofanto. Demostró cómo se resuelven las ecuaciones de segundo grado, y publicó una tabla de senos;[1] pero no sabemos si esto fue de creación propia o resultado del estudio en libros de autores más antiguos. También dio valores exactos a la suma de una serie de números enteros consecutivos (1 + 2 + 3 +…), como igualmente a la suma de sus cuadrados y cubos. Un matemático posterior, Brahmagupta (598-660), resolvió también ecuaciones de segundo grado y sumó progresiones aritméticas; mas tampoco podemos decir hasta qué punto era original su obra. La India de aquel periodo puede que no haya producido mucho nuevo conocimiento; pero hizo un gran don al mundo, a saber, una notación "posicional" para los números, según la cual el valor de un símbolo depende de su posición: es decir, nuestro propio sistema en el cual un símbolo puede denotar unidades, decenas, centenas, etc., según el lugar en que se encuentra. Tal sistema no era nuevo, porque había sido usado por los remotos babilonios (p. 15), pero entró en el mundo occidental a través de la India y de Arabia. En época posterior, el matemático indio Bhaskara (nacido en 1114) escribió una astronomía que contiene la primera explicación conocida de nuestros métodos actuales aritméticos de adición, sustracción, multiplicación y división.[2]

La ciencia en el islam

Por medio de esta combinación de adquisición de conocimientos y de influencias recibidas, los árabes se convirtieron en los guardianes del conocimiento científico del mundo. Sobre-

salieron como traductores, comentadores y escritores de tratados, y su objetivo no era tanto aumentar el conocimiento como recoger todo el que existía en su imperio. En el año 800, poco más o menos, el famoso califa Harún-al-Raschid poseía, traducidas al árabe, las obras de Aristóteles y de los médicos Hipócrates y Galeno, en tanto que su inmediato sucesor, al-Mamun, envió misiones a Bizancio y a la India para buscar qué obras científicas eran útiles para su traducción. Dadas las circunstancias, los mahometanos hicieron no pequeño servicio a la ciencia proporcionando un receptáculo del saber, como habían hecho los bizantinos antes que ellos, y asegurando el conocimiento conseguido para que no se perdiera irremisiblemente.

Química. En química y en óptica, sin embargo, hay verdadero progreso que anotar. Dos nombres han sobrevivido en química a la acción destructora del tiempo: Jabir-ibn-Hayyam y Geber. El primero, que parece haber florecido en la segunda mitad del siglo VIII, explicó la manera de preparar el arsénico y el antimonio, cómo refinar los metales y cómo teñir telas y cueros, aparte de otros adelantos que hizo en química aplicada. Fue menos feliz en el aspecto abstracto, introduciendo la falaz idea que había de descollar excesivamente en la historia posterior de la química, de que la materia que se quemaba perdía algo de su sustancia al quemarse. Añadió también dos nuevos "elementos" a los cuatro de los pitagóricos y de Empédocles, llamándolos mercurio y azufre, aunque él no quería significar con estas palabras lo mismo que hoy significan (p. 180). A éstos añadieron sus sucesores un tercer nuevo elemento: la sal.

Geber vivió acaso un siglo después, aunque hay mucha incertidumbre acerca de la fecha, hay quienes piensan que fue la misma persona que Jabir.[3] Quienquiera que fuere, Singer[4] lo ha descrito como "el padre de la alquimia árabe y, a través de ésta, de la química moderna". La alquimia árabe, como la anterior alquimia de Alejandría, difería de la química moderna en sus fi-

nes más que en sus métodos, limitándose al simple objetivo de transmutar las sustancias en oro o en plata. De esta suerte encontramos a Geber estudiando y mejorando los métodos tipo de entonces de evaporación, filtración, sublimación, fusión, destilación y cristalización, como igualmente preparando muchas nuevas sustancias químicas, como el óxido y el sulfuro de mercurio. También sabía cómo preparar los ácidos sulfúrico y nítrico, y la mezcla llamada *agua regia,* la cual puede disolver hasta el oro.

Óptica. También se concedió interés a la óptica y hubo una creciente apreciación de las posibilidades de instrumentos ópticos. Dice la leyenda que el faro de Alejandría había sido equipado con un aparato mediante el cual se podían ver en el mar barcos que de otra manera quedaban invisibles; si así fue, no se hicieron progresos hasta el tiempo de los árabes. En el siglo IX encontramos a Alkindi de Basora y Bagdad (813-880) escribiendo sobre óptica, y especialmente sobre refracción de la luz. Siglo y medio más tarde Ibn-al-Haithan o Alhacén (965-1038) estaba trabajando en El Cairo sobre la refracción. Halló que la ley de Ptolomeo era (p. 118) cierta únicamente para pequeños ángulos; pero no descubrió la verdadera ley. Estudió asimismo la acción de los espejos esféricos y parabólicos y el aumento producido por las lentes, y resolvió el problema (conocido todavía como el problema de Alhacén) de hallar la relación entre las posiciones de una fuente de luz y su imagen formada por una lente. Dio una explicación exacta de la visión, diciendo que vemos porque algo que viene del objeto visto pasa al interior del ojo, en oposición a la enseñanza de Euclides y de Ptolomeo de que vemos porque algo sale del ojo y toca el objeto. Con Alhacén estaba empezando la óptica a asumir su forma moderna.

No se descuidaron por completo otros estudios; pero no hubo ningún progreso sensacional. Por ejemplo, Alkirismi, que

fue bibliotecario del califa al-Mamun, escribió un tratado de álgebra[5] que influyó mucho en introducir nuestra actual notación numérica en la Europa occidental. En astronomía, Albatani, que murió en 929, determinó nuevamente la constante de la precesión (p. 112), y calculó algunas tablas astronómicas. En fecha posterior, Ibn-Yunas (hacia el año 1000), que fue acaso el más grande de los astrónomos árabes, hizo valiosas observaciones sobre los eclipses de Sol y de Luna y consiguió progresos sustanciales en trigonometría.

Mas aquella época fue menos notable por sus adelantos científicos que por la sucesión de hombres de saber enciclopédico, cada uno escribiendo sobre una gran variedad de temas. Alkindi, el primer filósofo entre los árabes, a quien ya hemos mencionado, dio a luz 265 publicaciones sobre los más variados temas, en tanto que el persa Rhaces (865-925), que fue en primer lugar médico, y lo fue extraordinariamente bueno, no sólo escribió sobre el sarampión y la viruela, sino asimismo sobre alquimia, teología, filosofía, matemáticas y astronomía. También Albiruni (973-1048), que era matemático y astrónomo, físico y geógrafo, médico e historiador. En la última de estas aptitudes es donde consiguió la mayor fama; pero también determinó el peso específico de cierto número de metales y de piedras preciosas por el método de Arquímedes.

La ciencia mahometana floreció reprimida hasta fines del siglo x, poco más o menos, y entonces empezaron a cambiar las condiciones. La edad de oro del islam había pasado ya y el gran imperio iba derrumbándose, sus clases directoras pereciendo y sus provincias más distantes separándose. La cultura iba descendiendo y con ella la ciencia. En Oriente, al menos, había terminado definitivamente su buena acogida anterior, e iba cayendo bajo los ataques de la religión que la hizo su antagonista y decía de ella que hacía "disminuir la creencia en el origen del mundo y en su Creador". Los mahometanos de Oriente fueron

pronto tan antipáticos a la ciencia como lo habían sido anteriormente los cristianos.

A medida que la ciencia mahometana se marchitaba en Oriente adquirió nueva vitalidad en Occidente, empezando en España, y más especialmente en Córdoba y Toledo. En Córdoba se fundó una academia y una biblioteca en el año 970, bajo el estímulo especial de sus califas, Abderramán III y Alhakem II. Gradualmente se extendió por la Europa occidental el interés por las ideas y el aprecio del saber árabe. Encontramos a Gerberto, quien fue después el papa Silvestre II, y murió en el año 1003, presentando una forma árabe del antiguo ábaco romano, en tanto que otro eclesiástico, Herman el Manco (1013-1054) del monasterio de Reichenau en Suiza, escribió libros de matemáticas y de astrología que acusaban fuerte influencia árabe. Un inglés, Adelardo de Bath (hacia 1090-1150), que se había disfrazado de estudiante mahometano y asistido a clases en Córdoba, escribió un compendio de ciencia árabe bajo el título de *Cuestiones naturales,* mientras que otro inglés, Roberto de Chester (hacia 1110-1160), presentaba al mundo occidental la alquimia árabe. Vivió en España durante muchos años y finalmente fijó su residencia en Londres en 1147. Un poco más tarde, otro inglés, John of Holywood (latinizado como Sacrobosco), natural de Yorkshire, escribió una *Astronomía* que no contenía casi nada más que traducciones de autores árabes, pero permaneció como libro de texto modelo sobre la materia durante algún tiempo.

Al mismo tiempo se traducía del árabe al latín un caudal de libros clásicos, de manera que las obras de Aristóteles, Euclides, Arquímedes, Apolonio y otros pudieran servir al mundo culto en lenguaje que pudieran entender. Adelardo de Bath había conseguido una copia de los *Elementos* de Euclides en árabe durante su estancia en Córdoba, e hizo una traducción que fue la base de todas las ediciones europeas de Euclides hasta que se

encontró el texto original griego, en 1533. Poco tiempo después, el español Domingo González de Toledo tradujo la física y otras obras de Aristóteles al latín, en tanto que Juan de Sevilla hizo lo mismo con los escritos astronómicos y astrológicos de Albatani, Alkirismi, Alfarabi, Alkindi y otros. Pero seguramente el traductor más laborioso debió de ser Gerardo de Cremona (1114-1187), quien aprendió el árabe residiendo en Ptoledo, y se dice que entonces tradujo 92 obras completas del árabe al latín, incluyendo el *Almagesto* de Ptolomeo, los *Elementos* de Euclides y obras de Apolonio, Arquímedes, Albatani, Alfarabi, Geber y Alhacén.

Aparte de aquellas traducciones sin fin, la España de aquel periodo produjo una pequeña suma de pensamiento original, especialmente en astronomía. El astrónomo Arzaquel, cordobés que vivió en Toledo hacia el año 1080, se anticipó a Kepler (p. 193) exponiendo que los planetas se movían alrededor del Sol en elipses, pero no encontró a nadie que tomara en consideración una hipótesis que tanto se oponía a las doctrinas del *Almagesto*. Próximamente, un siglo más tarde, al-Bitrugi de Sevilla (Alpetragius en latín) propuso remplazar el complicado sistema de Ptolomeo de ciclos y epiciclos por un sistema de círculos concéntricos. La traducción de su libro al latín por Michael el Escocés (hacia 1175-1235), constituyó el primer desafío a la astronomía de Ptolomeo en Europa occidental.

Uno de los últimos dones que la ciencia mahometana transmitió al mundo occidental fue el sistema de numeración "arábiga", el cual habían tomado de la India los mismos árabes (p. 127). Adelardo de Bath lo dio a conocer cuando tradujo al latín la *Aritmética* de Alkirismi a principios del siglo XII, pero el empeño más consciente para introducirlo fue obra del gran viajero matemático italiano Leonardo da Pisa, cuando aseguró en su libro más divulgado[6] que el sistema era muy poco conocido en Europa, y lo recomendó como más conveniente que el sistema

romano usado comúnmente. Poco tiempo después, John of Holywood empleó el sistema en un libro de texto de aritmética mucho más leído, el cual, igual que su astronomía, quedó como modelo de libro de texto sobre aquella materia durante largo tiempo. Pocos años después, en 1252, el rey de Castilla, Alfonso X, el Sabio, tuvo algunas tablas astronómicas de observaciones árabes calculadas de nuevo por judíos toledanos y las publicó con notación arábiga. Por estas y otras actividades análogas, la notación arábiga se fue introduciendo poco a poco y su uso fue ya muy común en el siglo xii. En aquel mismo periodo se llegó al final de la era de traducciones y libros de texto, en los cuales muchos individuos trataron de recuperar el saber de tiempos anteriores, y pocos lo ampliaron. La ciencia había entonces regresado al Occidente, y quedaba libre de avanzar por métodos occidentales.

Si resumimos los progresos de la ciencia bajo el islam, diremos, en primer lugar, su nueva notación de los números, y sus nuevos métodos para operar con ellos. En cuanto a lo demás, se había llegado a conocer el álgebra a un grado que era casi idéntico a nuestro actual conocimiento de álgebra elemental. La geometría permanecía donde quedó al final de la supremacía griega; pero entonces no había gran necesidad de su progreso, ya que el álgebra y la trigonometría les daban todo lo que necesitaban. La física se había liberado de la atmósfera especulativa, que la había envuelto en los tiempos griegos, y se había convertido en experimental en vez de contemplativa, paso enorme dado en la dirección justa. Determinar los pesos específicos de las piedras preciosas por un método viejo en mil años podrá parecer una estúpida obra de investigación a un físico moderno; pero está en el camino real que conduce a su actual progreso, en tanto que la orgía griega de especulación no llevaba a parte alguna. La ciencia había también llegado a apreciar de nuevo el valor de los instrumentos de óptica, aunque todavía

no sabemos de ningún intento de usarlos con propósitos astronómicos. También la química había comenzado a marchar por el buen camino, pero aún no se había desenredado enteramente de una alquimia fraudulenta.

La ciencia occidental

No debe suponerse que mientras la ciencia había conseguido estos progresos en el islam, había quedado completamente estancada en los otros lugares. No ciertamente, pero había gozado sólo de vitalidad espasmódica, floreciendo en el caso mejor únicamente en pequeñas regiones aisladas y de manera transitoria. La historia de tal espasmódico periodo de actividad comenzaba usualmente con una agitación procedente de arriba, con frecuencia producida por un personaje de elevada posición, que no conseguía despertar ningún verdadero interés en las masas de población, entre las cuales muy pocos tenían la educación necesaria para interesarse por la ciencia. Cualquier interés que pudiera haber por la genuina ciencia, de ordinario era al fin transferido a las ciencias espúreas: alquimia, astrología y magia; éstas alegaban en su favor que eran ventajosas a sus devotos, en tanto que la verdadera ciencia, ofreciendo conocimiento únicamente por razón de sí mismo, no podía hacer tales alegatos.

Ejemplo destacado de esto aconteció en el año 787, cuando Carlomagno resolvió estimular la instrucción en su imperio y decretó que toda abadía tenía que fundar una escuela. Encargó a dos frailes, Pedro de Pisa y Alcuino de York, que estaban agregados a su corte, el cumplimiento de esta orden, y sus empeños consiguieron que se desplazara algún saber del Oriente al Occidente; pero habían de transcurrir varios siglos antes de que se difundiera algún interés por la ciencia. De modo análogo, en el siglo x, dos de los emperadores bizantinos, León VI y

Constantino VII, demostraron entusiasmo por la astronomía, pero poco se extendió, incluso en las capas sociales educadas de la población.

Difícilmente podemos apartarnos de la cuestión del verdadero interés de la ciencia medieval sin detenernos un momento a contemplar la figura fantástica y sorprendente de Federico II, emperador del Sacro Romano Imperio (1194-1250), a quien sus amigos llamaron *Stupor mundi,* maravilla del mundo. Tanto era su talento y tan varios sus conocimientos, ya como erudito y poeta, o como soldado y estadista, o incluso como mero lingüista, que el mundo no podía en ningún caso pasarlo por alto. Mas él no se preocupaba en absoluto de impedirlo, y estaba pronto a atraer la máxima atención sobre sí mismo, poseyendo un gran harem y viajando con un equipo de elefantes, dromedarios y otros animales pintorescos que difícilmente dejarían de sorprender incluso en aquel siglo XIII lleno de color.[7] Se ha dicho de él que había denunciado a Cristo, a Moisés y a Mahoma como un trío de impostores, y emprendió una serie de reyertas con el papa, quien lo excomulgó dos veces, la primera cuando no salió en una cruzada que había jurado emprender, y la segunda, cuando decidió ir después de todos. No obstante, su personalidad agitada y vivaz, encontraba tiempo y energía para un genuino interés en las cosas del intelecto: filosofía y matemáticas, astrología y medicina en particular; y mostró su interés por ayudarlas activamente. Era la época en que empezaban a existir las grandes universidades medievales[8] y a Federico se deben las de Nápoles y Padua. Dispuso además de cierto número de obras árabes traducidas por un grupo de judíos. No se ha puesto en claro si su objeto principal era ayudar a la ciencia o molestar al papa (consiguió ambas cosas); pero los resultados fueron buenos, y debido a su acción quedaron en disposición de utilizarse copias de las obras de Euclides, Arquímedes, Apolonio, Ptolomeo y otros.

En una ocasión interrumpió un viaje al pasar por Pisa para probar por sí mismo los extraordinariamente famosos talentos matemáticos de Leonardo de Pisa, y preparó un torneo en el cual se planteaba “un problema en el papel” a todos los participantes. Se han conservado, y los problemas son de interés porque demuestran el elevado nivel matemático de aquella época. Uno de los problemas (enunciado en lenguaje moderno) era hallar un número x, tal, que $x^2 + 5$, x^2 y $x^2 - 5$ sean cuadrados perfectos. Leonardo halló la solución exacta: $x = {}^{41}/_{12}$.[9] Otro problema era resolver la ecuación $x^3 + 2x^2 + 10x = 20$ por métodos geométricos. Leonardo demostró que esto es imposible; pero halló la solución algebraica, que es $x = 1.3688081075$, que contiene nueve cifras decimales exactas.[10] Leonardo se presentó triunfalmente, habiendo resuelto varios de los problemas correctamente, mientras que nadie más resolvió absolutamente ninguno.

La ciencia en las órdenes monásticas

En aquel tiempo no sólo se fundaron las universidades medievales, sino también dos órdenes monásticas, los franciscanos o frailes pardos, en 1209, y los dominicos o frailes negros en 1215, las cuales, ambas, ejercieron influencia en el progreso de la ciencia. Al principio, los acontecimientos eran de significación puramente religiosa. San Francisco, hijo de un opulento comerciante de Asís, experimentando una súbita conversión, abandonó una vida desordenada, alegre y despreocupada para dedicarse a aliviar sufrimientos y a predicar el arrepentimiento. Todo ello lo hizo con entusiasmo; hemos leído que saltó de su caballo para besar a un leproso que encontró en su camino y que predicaba la buena nueva del Evangelio a los pájaros y a los peces. Fundó una orden de frailes que al principio tuvo por objeto seguir sus pasos, predicando al pueblo sencillo en sencillo lenguaje. Mas pronto hallaron que la comarca estaba infestada

con herejías de todo género, y entonces se dedicaron a adquirir instrucción para hacerse, de este modo, capaces de refutarlas.

Los dominicos estaban fundidos en molde muy diferente. Su fundador, santo Domingo (1170-1221) era un teólogo profesional que había ya alcanzado la dignidad de la cátedra cuando fundó su orden. Grave y austero en su vida personal, ardía en celo por la extirpación de todo género de herejía, pero más particularmente por la de los albigenses, quienes defendían que había dos dioses, uno bueno y otro malo, padres respectivamente de Jesús y de Satanás. Después de haber predicado él mismo durante 10 años contra aquella herejía, santo Domingo fundó su orden de predicadores, los cuales, viviendo con extremada pobreza y ascetismo, habían de esparcir las verdaderas doctrinas por todo el mundo. También éstos encontraron que su labor misionera exigía reservas de conocimientos. Hicieron un esfuerzo especial para hallar arraigo en las universidades y ocuparon cátedras en la mayor parte de ellas, al mismo tiempo que su pasión por la ortodoxia fue a dar en un fanatismo e intolerancia que halló su punto culminante en la Inquisición, de tal modo que el Inquisidor General en la mayor parte de las naciones fue un dominico.

Los miembros de estas dos órdenes aportaron buena proporción de científicos y maestros de los dos siglos inmediatos, procediendo principalmente los científicos de los franciscanos, mientras que los dominicos produjeron otros que figuraron de modo prominente en la historia del pensamiento.

Santo Tomás de Aquino. El más destacado entre los últimos fue naturalmente santo Tomás de Aquino, el más grande de todos los teólogos medievales. En su *Summa contra Gentiles* (1259-1264) arguye que el conocimiento puede obtenerse por medio de dos diferentes canales: la fe y la razón natural. La fe deriva su conocimiento de las Santas Escrituras; la razón natural de los datos de los sentidos, los que interpreta y transforma por un

proceso de raciocinio, del cual aportan ejemplo soberano las obras de Platón y de Aristóteles. Puesto que ambos géneros de conocimiento vienen de Dios, que no puede contradecirse a sí mismo, deben estar de acuerdo. De esto se deduce que las obras de Platón y de Aristóteles tienen que estar de acuerdo con las doctrinas de la religión cristiana, y en su *Summa theologica* consideró santo Tomás que había determinado que así es ciertamente. Edificando sobre esta base desarrolló el sistema filosófico conocido ahora como la *escolástica.* Toma ésta su nombre del sistema de escuelas que había instituido Carlomagno en el siglo VIII (p. 134), pero no llegó a adquirir importancia hasta que santo Tomás la desarrolló en un cuerpo de doctrina consistente en el siglo XIII. Este siglo vio su rápido crecimiento, pero de igual manera los dos siglos siguientes vieron su rápida decadencia y su caída. Dándose a la lógica escueta, a sutilezas abstractas y a trivialidades que nada interesaban a la vida del hombre, perdió pronto su asidero en la humanidad pensante, y en el siglo XVI había fenecido, aventada su existencia por las frescas brisas del Renacimiento. Del mismo modo que surgió y cayó la escolástica ocurrió con la fe en la infalibilidad de Aristóteles.

Los franciscanos, más bondadosos y más humanos, dieron menos importancia a la seguridad de sus opiniones y más a la seguridad de su conocimiento, el cual intentaban refrenar por comparación directa con las obras de Dios. Entre los hombres de ciencia de su orden sobresalieron varios que ocuparon elevadas dignidades en la Iglesia. Robert Grosseteste (1175-1253), canciller de la universidad de Oxford y obispo de Lincoln, y John de Peckham (1220-1292), fueron dos de éstos. Ambos escribieron sobre problemas de óptica del género estudiado por Alhacén, en tanto que el mismo Grosseteste hizo experimentos con espejos.

Roger Bacon (1214-1294). Pero el más importante de los hombres de ciencia franciscanos fue un fraile sencillo que no llegó a ningún puesto elevado, ni en la Iglesia ni fuera de ella. Había nacido cerca de Ilchester en Somerset, y estudió primero en Oxford y después en París. Poco se sabe con certeza acerca de su vida posterior, pero se cree que volvió a Oxford aproximadamente en 1250, y allí dio conferencias con gran éxito. A pesar de sus riquezas, que eran sustanciales, pronto las consumió e hizo los votos en la orden franciscana, que sólo le sirvieron para descubrir que una vida puramente religiosa no contenía satisfacciones para él, mientras que al intentar volver a la actividad científica incurrió en el desagrado de sus superiores monásticos. Durante 10 años vivió vigilado y bajo prohibición de escribir. Luego, en 1266, con alegría suya difícil de expresar, su antiguo conocido, Guy de Foulques, entonces papa Clemente IV, lo invitó a resumir su obra científica, y se cree que abogó por su caso, personalmente, con las autoridades franciscanas. Finalmente se le dio permiso, y en el espacio de dos años había enviado al papa su *Opus majus,* que era una especie de compendio general de las ideas científicas y del saber de aquella época. Pero Clemente murió en 1268 y Bacon se halló pronto en nuevas dificultades con sus superiores franciscanos. En el año 1278 fue sometido a juicio en París, condenado por opiniones heterodoxas y pasó la mayor parte del resto de su vida en prisión.

Se rumoreaba que Bacon no sólo se interesaba por la verdadera ciencia, sino también por las artes tenebrosas; es el caso que con el carácter de un espeluznante nigromántico es como se le conoció en todo el mundo. De la ciencia fue la óptica la que más le interesó. Comprendió las leyes de la reflexión y refracción de la luz, y explicó cómo pueden disponerse las lentes para servir de anteojos (con frecuencia se le atribuye la invención de éstos) y telescopios, aunque no hay ninguna referencia de que los hubiera construido jamás. Pero no fue esto en modo

alguno su único interés, y hallamos su inteligencia recorriendo la mayor parte de las ciencias de una manera imaginativa y fantástica, aunque a menudo poco práctica. Describió cómo se podían construir carruajes, navíos y máquinas voladoras movidos mecánicamente (los imaginarios antepasados de nuestros automóviles, barcos de vapor y aeroplanos) y estudió los usos posibles de la pólvora y del fuego producido por cristales o lentes, la circunnavegación del globo y otras cosas que parecieron extrañas en aquel tiempo, pero que hoy se han convertido en lugares comunes. Se pronunció contra la idea de la "naturalidad" del movimiento circular, condenó el sistema astronómico de Ptolomeo como anticientífico y lo tuvo como probablemente falso.

Mas sus principios generales eran más importantes que sus proezas antes detalladas, las cuales fueron, después de todo, bastante pobres. En su *Opus majus* defendió que las matemáticas deberían ser la base de toda educación liberal, puesto que solamente éstas "pueden purgar el intelecto y preparar al estudiante para la adquisición de todo conocimiento". Persistió en que el conocimiento científico sólo podía adquirirse por experimentación; que únicamente por ésta se llegaba a la certeza, mientras que todo lo demás son conjeturas.

Esto parece hoy evidente, pero no lo era así cuando lo escribió Bacon. Entonces no existía aún más que una vaga idea de aceptar el veredicto de la naturaleza, revelado por experimentos, como árbitro final de la verdad. Los hombres no sabían plantear problemas a la naturaleza a fin de interpretar sus respuestas. En realidad, podían interrogar si un fenómeno dado estaba de acuerdo con el experimento, pero preguntaban primero (y era una cuestión más fácil de contestar) si estaba de acuerdo con Aristóteles o de conformidad con las Sagradas Escrituras. Y los que sostenían que Aristóteles y las Escrituras, como representantes de la razón y de la revelación, tenían ne-

cesariamente que estar de acuerdo, la razón con la revelación y ambas con la verdad, no iban por lo común tan lejos como lo es inquirir en los hallazgos de la experimentación.

Bacon hizo objeciones a esta concepción mental; pero no fue más allá. No era un revolucionario, sino hijo de su tiempo, y estaba tan firmemente convencido como sus contemporáneos de que, en último término, la ciencia debe hallarse de acuerdo con la religión cristiana y establecer de este modo su verdad. Vino al final de una época; pero fue su muerte, no su nacimiento ni su vida, la que señaló este final. Amanecía una nueva era, en la cual ya no buscarían los hombres el descubrimiento de la verdad leyendo las opiniones de los antiguos autores, sino mediante el examen de primera mano de las obras de Dios.

Señales de la aurora que se acerca

No es muy fácil ver por qué ocurrió este último cambio; es demasiado superficial el explicarlo mediante la simple palabra *renacimiento*. El renacimiento clásico en la literatura había adquirido escasamente alguna fuerza, y la influencia que produjo fue en el sentido de volver el pensamiento de los hombres a las ideas de los antiguos. En ciencia se produjo el movimiento en sentido contrario. La ciencia se estuvo aprovechando en gran escala del acceso a los escritos científicos de los griegos, pero la línea de pensamiento se apartó de los métodos científicos de éstos. Acaso la explicación de aquel conocimiento científico, diferente de la imaginación literaria, es que su naturaleza es acumulativa, y que la ciencia medieval había alcanzado una etapa en que tenía que ofrecer más que la ciencia griega, al revés de lo que sucedía en la literatura.

La primera ciencia que hubo de beneficiarse del pensamiento de nuevo independiente fue la astronomía. El nombre que en primer lugar atrae nuestra atención es Oresme, obispo de Li-

sieux (1332-1382), hombre de grandes y variadas actividades, que había sido consejero confidencial de Carlos V de Francia, y después tutor de Carlos VI. No sólo era eclesiástico y teólogo prominente, sino que se distinguió también en matemáticas y en economía. Escribió un tratado sobre la moneda legal, que es digno de notar por el uso de fracciones ordinarias como las que hoy usamos: $^{3}/_{4}$, $^{1}/_{8}$, etc. Pero su interés principal para nosotros es que combatió la doctrina aristotélica de la inmovilidad de la Tierra.

Aproximadamente un siglo después este desafío lo repitió Nicolás de Cusa, hijo de un pescador, que se había elevado sin influencia hasta ser cardenal de la Iglesia. Rechazó enteramente la astronomía tradicional y expresó la opinión de que la Tierra "se mueve como lo hacen las otras estrellas".

Los cinco últimos nombres que hemos tenido ocasión de mencionar han sido todos de eclesiásticos de una u otra especie: la educación era casi prerrogativa exclusiva de la Iglesia. Uno de los cinco, Roger Bacon, sufrió casi continuos trastornos por sus actividades científicas (pero nunca, según los datos que conocemos, por sus opiniones científicas), mientras que los otros cuatro, quienes ocuparon altas dignidades en la Iglesia, tuvieron libertad, al parecer, no sólo para el estudio de la ciencia, sino incluso para expresar sus opiniones, que eran opuestas a las enseñanzas tradicionales de la Iglesia. Enseñar que el mundo es esférico equivale a negar de modo categórico lo que dicen de la creación las Escrituras, y no obstante esto, era corriente enseñarlo, así como la nueva concepción de la Tierra como estrella en movimiento. En general, la Iglesia era en esta época tolerante con los progresos de la ciencia, suavizada acaso por la creencia común de que la ciencia se vería obligada con el tiempo a sostener y confirmar la ortodoxia; la Iglesia se permitió, por decirlo así, el ser tolerante, al menos por algún tiempo.

Con esta actitud de la Iglesia se combinaron muchos otros factores para augurar a la ciencia un porvenir brillante. El espíritu humano no sólo iba recuperando su libertad de pensar largo tiempo perdida, sino que entonces tuvo a su disposición los casi ilimitados escritos de la era más grande del pensamiento antiguo, además de los de épocas posteriores. Algo más hacía falta, que exactamente vino en el momento más oportuno.

El conocimiento científico primitivo se había difundido de viva voz. Vino después la edad de las grandes bibliotecas, como las de Alejandría y Bizancio. En éstas podían leer muchos miles de libros quienes tuvieran los medios y tiempo libre para emprender un viaje e ir a ellas. Fuera de estas bibliotecas, los libros eran raros y costosos, puesto que la producción de una simple copia significaba una tarea colosal de escribir o transcribir en costosos pergaminos: acaso 10 veces tanto trabajo como se invierte hoy en preparar el tipo de una edición de miles de ejemplares.

Los chinos, hacia principios de la era cristiana, habían inventado una especie de papel, que usaban para imprimir láminas en el siglo IX, y para imprimir con tipos móviles en el siglo XI. En el siglo XIV, este arte últimamente citado se descubrió independientemente en Europa, y desde entonces la impresión de libros se hizo posible en cantidades siempre crecientes, hasta ahora, en que cada hombre puede tener una biblioteca suya propia en una estantería de unos cuantos pies en su propio hogar.

Con el tiempo, pero no inmediatamente, la llegada de la imprenta hizo más accesibles los conocimientos científicos y de este modo se difundieron más. Las obras religiosas y las literarias se juzgaron como merecedoras del primer puesto en las imprentas recién establecidas: primero la Biblia (1454) y después los autores griegos y clásicos. No se había impreso ningu-

na obra científica antes de aparecer la *Historia natural* de Plinio en Venecia, en 1469. Le siguieron, en 1471, las obras de Varrón, un caballero de la campiña romana (116-27 a. C.), el cual había escrito una enciclopedia de las ciencias. Hasta este momento no había sido muy acertada la elección de autores científicos, pero pronto mejoró. En 1475 se publicó la traducción latina de la *Geografía* de Ptolomeo, y en 1476 tres obras biológicas de Aristóteles, también en latín. Se publicó a Euclides en latín en 1482, y una adecuada edición de Aristóteles en griego en 1495. Pero el *Almagesto* de Ptolomeo no se publicó hasta 1528, y *Psammites* de Arquímedes hasta 1544, ambos publicados en Basilea.

Todo era entonces favorable a un periodo de actividad científica, que vino en forma de pequeños arroyuelos durante el siglo XVI y de torrente arrollador en el XVII.

V
NACIMIENTO DE LA CIENCIA MODERNA
(1452-1600)

Se ha intentado muchas veces fijar una fecha a los comienzos del renacimiento literario; como, por ejemplo, 1453, el año en que los turcos tomaron a Bizancio y los tesoros de su biblioteca se desparramaron por toda Europa. Pero no vale la pena esforzarse; el renacimiento no vino en una noche, sino a través de un lento desarrollo durante siglos.

Lo mismo ocurre respecto del renacimiento del espíritu científico, del cual hemos de ocuparnos en este capítulo. No revivió sino gradualmente, después de sus mil años de marasmo. Mas, si nosotros tuviéramos que elegir un año determinado, escogeríamos el 1452, el año precedente al antes mencionado. Porque en este año nació Leonardo da Vinci, a quien muchos saludan como el primer científico que desenredara su pensamiento de todas las ideas confusas y erróneas de la Edad Media y que intentara el estudio de la naturaleza con espíritu verdaderamente moderno. Con Leonardo adopta la ciencia los modernos objetivos y los métodos modernos. Por consiguiente, no es impropio comenzar el presente capítulo con una breve mención de este hombre verdaderamente extraordinario.

Leonardo da Vinci (1452-1519). El lugar de su nacimiento está situado cerca de Empoli, en la carretera de Florencia a Pisa. Era hijo natural de un abogado y de una muchacha aldeana que después se casó con un ganadero; su bella apariencia y acogedoras maneras lo señalaban como muy apropiado para la vida de corte, y de hecho estuvo agregado a las Cortes de Florencia, Milán y Roma, sucesivamente. Pero sus dotes personales, por

visibles que pudieran ser, no podían compararse con los de su espíritu. Los que han estudiado su obra le atribuyen talentos casi sobrehumanos; sus cuadernos de notas, descubiertos y descifrados recientemente, confirman estas estimaciones e incluso aumentan su reputación como uno de los intelectos más sobresalientes de la raza humana.

Fue en primer lugar un artista, dedicando sus mejores energías a la pintura y la escultura, pero sobresalió de igual modo en otros diversos campos: en arquitectura e ingeniería, en filosofía y en ciencia, y los cuadernos de notas informan que pudo haber hecho lo mismo todavía en otros si se hubiera ocupado en hacerlo. Tuvo el proyecto de escribir libros de texto sobre todos sus diferentes temas de estudio y, de haber realizado este propósito, la ciencia se habría podido librar de tomar caminos con direcciones equivocadas.

Por desgracia, sus defectos eran casi tan grandes como su talento. Aparte de que prefirió el arte, parece que trabajó torpe, trabajosa y lentamente, de suerte que su producción científica acabada fue escasa en cuantía: la verdad es que rara vez terminaba ninguna cosa. Su éxito positivo más conocido es probable que sea la explicación de la débil iluminación que aparece en la parte oscura de la Luna en los momentos de Luna nueva: "La vieja Luna en brazos de la Luna joven". Leonardo acertó al atribuirlo al "resplandor terrestre" que refleja desde la Tierra la luz que ésta recibe del Sol. Realizó también algunos trabajos experimentales de género muy práctico en óptica, mecánica e hidráulica. En las ciencias aplicadas hizo planos y dibujó modelos de máquinas voladoras, helicópteros y paracaídas, como igualmente para armas de tiro rápido y cañones de grueso calibre. Sus 750 dibujos anatómicos lo sitúan en primera fila entre los anatomistas del mundo.

Pero lo que principalmente denotó su talento científico fueron sus especulaciones no comprobadas y sus opiniones sin ve-

rificación subsiguiente. En fisiología se anticipó a Harvey en su descubrimiento de la circulación de la sangre, pues sospechó que la corriente sanguínea del cuerpo humano es como la corriente cíclica del agua, que cae en las montañas en forma de lluvia, fluye desde allí a los ríos y mares, vuelve a las nubes y completa el circuito cayendo de nuevo en forma de lluvia. Dijo que la sangre aporta nuevos materiales a las diferentes partes del cuerpo y arrastra consigo los materiales de desecho, en modo parecido a como echamos leña a un horno y sacamos fuera las cenizas. En astronomía pensaba que la Tierra era "una estrella parecida a las otras estrellas" (queriendo decir un planeta como los demás planetas), y sugirió la idea de un mundo heliocéntrico, aunque antes otros habían expuesto ya esta idea. En mecánica dijo que "todo cuerpo pesa en la dirección en que se mueve", y afirmó que un cuerpo que cae aumenta su velocidad a medida que continúa su caída. Por consiguiente, parece haber comprendido que la fuerza produce en primer lugar aceleración más que simple movimiento, en contra de la doctrina aristotélica de que la fuerza es necesaria para el movimiento, y anticipando el rasgo característico de la mecánica de Galileo (p. 171). Insinuó que el universo entero marcha de acuerdo con leyes mecánicas inalterables, lo cual era, naturalmente, una repetición de las remotas especulaciones de Demócrito y Anaximandro; pero asimismo se anticipó a Newton, aunque sin demostraciones o pruebas. En óptica consideraba la luz como un fenómeno ondulatorio, con lo que, si bien ya lo habían expresado otros anteriormente, anticipó la teoría ondulatoria. Todo esto era suposición, pero eran las suposiciones de una cabeza que pensaba con libertad y desencadenada de autoridad ajena, y hay que admitir que denotan cierta virtud del genio. La buena suerte puede hacer que cualquier necio acierte con una suposición excelente o con una predicción exacta acá o allá; pero cuando a un gran acierto sucede otro, y otro y otro, en sucesión casi

ininterrumpida, algo más que la buena suerte está en acción. Para que nos formemos la idea del valor de las suposiciones de Leonardo, parémonos a pensar lo que se habría ganado si sus opiniones pudieran haber remplazado a las de Aristóteles para contrastar cualquier teoría antes de que pudiera atraer la atención del mundo ilustrado.

Acaso el mayor servicio que Leonardo hizo a la ciencia fue la exposición de los principios que debían regir la investigación científica. Antes de su época hubo hombres que bastante a menudo intentaron saber más por medio de la observación y del experimento; pero casi siempre sus ideas estaban constituidas por ideas preconcebidas o por principios generales como que el movimiento natural es el propio de la naturaleza o que sirviera a un predeterminado fin. Leonardo fue muy prudente acerca de la invocación de principios generales. Verdad es que estudió la mecánica de la palanca según el principio de que el movimiento continuo es una imposibilidad; pero este principio no lleva consigo una noción preconcebida de cómo debieran ser las cosas, sino miles de años de experiencia referente a cómo son en realidad, experiencia que no es menos real porque en su mayor parte se haya adquirido inconscientemente.

Leonardo estaba de acuerdo con Aristóteles al insistir en que sólo el razonamiento matemático puede dar la completa certeza en cuestiones de ciencia; pero se apartó de Aristóteles en que éste lo tenía por un ideal deseable pero que en su mayor parte es imposible de alcanzar. Una ciencia, decía Leonardo, debería basarse en la observación; examinar las observaciones mediante la matemática y terminar con un experimento concluyente para probar sus conclusiones finales. Sus puntos de vista generales sobre el método científico eran muy parecidos a los que Roger Bacon había expresado un siglo antes, pero la visión de Bacon estuvo siempre restringida por anteojeras teológicas, en tanto que la mente de Leonardo trabajaba perfectamente libre.

A esta nueva concepción de los métodos científicos siguió una nueva concepción del universo y de la posición que el hombre ocupa en éste. Copérnico tuvo la evidencia de que Aristarco estaba bien en lo cierto cuando sostenía que la Tierra no ocupaba la posición central en el universo, sino que, al igual que los demás planetas, era un simple viajero del espacio, que describía una órbita anual alrededor del Sol.

Astronomía

Copérnico (1473-1543). Mikola Koppernigk (latinizado como Nicolas Copernicus) nació en Torun (Thorn), en la Pomerania polaca, el 14 de febrero de 1473. Su padre, ciudadano eminente de aquella ciudad, había nacido en Cracovia, adonde su familia había anteriormente emigrado desde Silesia. No hay tanta seguridad respecto de los antepasados de su madre, pero se cree que procedía de una acaudalada familia de Silesia. Cuando Nicolás tenía 10 años de edad su padre falleció, y un tío suyo, eclesiástico eminente, lo educó para altas dignidades de la Iglesia. Después de salir de la escuela estudió en varias universidades hasta después de pasados los 30 años de edad: primero en la universidad polaca de Cracovia y después en las universidades italianas de Bolonia, Ferrara y Padua, sucesivamente.

Su educación fue larga, pero un hombre culto de esta época consideraba todo conocimiento como cosa suya y no limitaba su educación a adquirir capacidad en una rama particular del saber. Con este espíritu Copérnico adquirió profusión de conocimientos en los clásicos, en matemáticas y astronomía, en medicina, derecho y economía y, naturalmente, en teología. Todo este saber no lo dejó ocioso, sino que lo puso en acción plenamente, incluso después de haber llegado a elevada posición en la Iglesia; conocemos referencias de que curaba a los enfermos indigentes igual que a sus colegas eclesiásticos; escribió

sobre economía y dio consejos al gobierno polaco sobre cuestiones monetarias,[1] construía sus propios instrumentos, escribía poesías e incluso pintaba, por lo menos en lo que significa hacerse un autorretrato. También consiguió éxitos como administrador, como gerente de propiedades y como diplomático en una conferencia de paz de importancia secundaria. De igual manera que Leonardo, anterior a él, fue hombre de extensos conocimientos y de talentos varios, pero su interés principal estuvo siempre en las matemáticas y en la astronomía.

Estas materias figuraban extensamente en la enseñanza de las universidades medievales y nos encontramos a Copérnico escuchando conferencias sobre Euclides, sobre geometría esférica, sobre geografía, sobre astrología y sobre la astronomía de Ptolomeo.

Esta última era aún la astronomía oficial en las universidades y en la Iglesia, pero buen número de pensadores avanzados se estaban ya sintiendo escépticos acerca de ella, y abogando por algo más parecido a la astronomía heliocéntrica de Aristarco; ya hemos dado noticia de las opiniones sobre astronomía del obispo Oresme de Lisieux, del cardenal Nicolás de Cusa y de Leonardo da Vinci. Otro del mismo modo de pensar fue Domenico Novara, profesor de matemáticas y de astronomía en Bolonia, cuando Copérnico estudiaba allí, cuya amistad siguió cultivando después de abandonar esta universidad. La obra de los pitagóricos, que por entonces se hizo accesible a los eruditos europeos, proclamaba que la última verdad acerca del universo debía consistir en sencillas, elegantes y armoniosas relaciones, y Novara pensó que la astronomía de Ptolomeo era excesivamente engorrosa para adaptarse a este criterio. Podemos afirmar que sus dudas y sus críticas influyeron en el pensamiento del joven, de tal manera que al volver, más adelante, a Polonia, a ocupar una canongía en la catedral de Frauenburgo,

llevó consigo la preocupación por el problema de la astronomía de Ptolomeo.

Sus lecturas le mostraron que los filósofos de la Antigüedad habían sostenido opiniones diferentes respecto de si la Tierra estaba inmóvil o en movimiento. En la dedicatoria de su obra magna, *De revolutionibus orbium coelestium,* al papa Pío III, llama la atención sobre que, "de acuerdo con Cicerón, Hicetas había pensado que la Tierra se movía […] y de acuerdo con Plutarco otros sostuvieron la misma opinión".[2] Esto, decía Copérnico, condújole a largas meditaciones sobre este tema, las cuales tomaron forma definitiva en el sistema propuesto en su libro.

Copérnico empezaba su estudio haciendo notar que "cada cambio de posición observado se debe al movimiento, o bien del objeto observado o bien del observador, o a movimientos de ambos […] Si la Tierra tuviera algún movimiento, éste sería advertido en todo aquello que estuviera situado fuera de la Tierra, pero lo sería en la dirección opuesta, exactamente como si cada cosa viajara dejando atrás la Tierra". La relación es análoga a lo que dice Eneas en Virgilio: "Salimos a la vela de la bahía y los campos y ciudades retroceden". Inmediatamente piensa Copérnico que la aparente revolución diaria de la "esfera de las estrellas fijas" puede explicarse del siguiente modo: la Tierra, y no esta esfera de estrellas, gira sobre sí misma una vez al día. Esta opinión, continúa, fue defendida por los pitagóricos Heráclides y Ecfanto, y por Nicetas de Siracusa (según dijo Cicerón), el cual afirmó que la Tierra gira en movimiento de rotación en el centro del universo. Y continúa aquél:

> No sería, por consiguiente, extraño que alguien atribuyera a la Tierra, además de su rotación diaria, algún otro movimiento. Se dice que el pitagórico Filolao, matemático nada corriente, creía que la Tierra gira, que se mueve en el espacio con varios movimientos, y que pertenece al grupo de planetas; a consecuencia de esto, Platón no demoró el viaje a Italia para entrevistarse con él.

Hemos visto que el sistema de Ptolomeo situó la Tierra en el centro del universo y suponía que el Sol se movía describiendo

una órbita circular. Más allá de la órbita del Sol hay tres órbitas circulares más, en las cuales nada se mueve sino las abstracciones matemáticas conocidas como *planetas ficticios*. Los planetas reales Marte, Júpiter y Saturno se mueven alrededor de aquellos planetas ficticios describiendo pequeños círculos conocidos como *epiciclos*. Todos éstos son del mismo tamaño, y en cada momento están los planetas en posiciones "correspondientes" en sus epiciclos; esto es: las líneas trazadas desde los planetas ficticios señalaban la misma dirección, la cual era la dirección de una línea trazada desde la Tierra al Sol (véase fig. III.6.).

Está claro que todo esto es artificioso; pero su mismo artificio proporciona la clave de su verdadero significado. Cuando un niño va sentado en un tíovivo emplazado en una verbena, los objetos distantes y los espectadores le parece que avanzan y retroceden alternativamente, como resultado de la carrera que él describe en su movimiento. Si se mueve en una circunferencia de siete metros de radio, entonces los objetos de afuera le parecen al niño moverse en circunferencias de siete metros de radio, y siempre aparecerán en posiciones correspondientes en estas circunferencias. El movimiento aparente de muchos objetos es una especie de "reflejo" de un movimiento real, por ejemplo, el del niño.

Pensó Copérnico que los movimientos aparentes de los planetas en sus epiciclos podrían explicarse de manera semejante como reflejos de un movimiento real de la Tierra alrededor del Sol. Si así fuere, el movimiento total del sistema solar consistiría en que la Tierra y los planetas se moverían en órbitas circulares alrededor de un Sol central fijo, de suerte que la Tierra fuera un simple "viajero" entre otros varios, en tanto que "el Sol, como si estuviera sentado en su trono real, gobernaría la familia de estrellas que giran a su alrededor". No era nueva esta hipótesis, puesto que es idéntica a la que Aristarco había expuesto unos 1 800 años antes. Lo que Copérnico había hecho

era demostrar que el viejo sistema de Aristarco podía explicar los movimientos observados de los planetas, o mejor dicho, que este sistema produciría precisamente la misma apariencia en el firmamento que el complicado movimiento en epiciclos de Ptolomeo.

Pero esto era cierto únicamente respecto del sistema de Ptolomeo en su más simple y primitiva forma, y se sabía desde largo tiempo que no era adecuado para observar con gran seguridad los movimientos de los planetas; había necesitado enmiendas de tiempo en tiempo; primero por el mismo Ptolomeo y después por sus sucesores árabes, hasta que efectivamente llegó a ser sumamente complicado. Copérnico ni siquiera podía estar seguro de su propio esquema ni esperar que otros lo aceptaran, a menos que pudiera corregirlo de manera que se ajustara a las mejores observaciones aprovechables. Es aquí donde Copérnico halló su más formidable tarea, a la cual dedicó años de arduo y fatigoso trabajo.

La mayor parte de este trabajo fue superfluo. Sabemos hoy que sólo hacía falta una pequeña corrección, a saber: remplazar las órbitas circulares de los planetas por curvas ligeramente ovales; para ser exactos, por elipses (p. 53), las cuales eran casi circulares, pero no enteramente; Kepler demostró esto en 1609. Pero Copérnico, cuya mente estaba todavía empapada en las doctrinas pitagóricas y aristotélicas sobre lo "natural" e "inevitable" del movimiento circular, no podía pensar en cosa tan sencilla como descartar las circunferencias del esquema de Ptolomeo; la corrección más fuerte que pudo imaginar fue la de añadir más circunferencias. De esta suerte añadió algunas nuevas circunferencias en la forma de epiciclos semejantes a los que acababa de eliminar y aumentó la complejidad de las circunferencias que ya estaban en el esquema haciéndolas "excéntricas"; esto es: suponiendo que los centros de las órbitas planetarias no coincidían con el Sol. En resumen, trató de establecer

mejor concordancia con las observaciones exactamente por los mismos artificios apolillados que habían empleado los matemáticos de los 1 400 años anteriores.

Su inexperiencia en la astronomía práctica aumentó sus dificultades, porque concedía igual atención a todas las observaciones, buenas o malas, antiguas y modernas, incluyendo unas cuantas de su cosecha, de suerte que una mala observación podía desconcertar todo el sistema. Por dos veces introdujo complicaciones innecesarias para dejar sitio a fenómenos que, como sabemos hoy, no existen sino en sus defectuosas observaciones. No aspiraba a una gran exactitud, porque se nos refiere que dijo que si pudiera hallar una coincidencia con error menor de 10′ de arco sería tan famoso como había sido Pitágoras por el descubrimiento de su famoso teorema.

Al fin, después de años de arduo trabajo, el sistema quedó completo. Naturalmente, había pasado por todas las pruebas de observación, porque había introducido una complicación tras otra para conseguirlo. Éstas hicieron tan complicados sus detalles como era sencilla la idea central. Ptolomeo había necesitado 80 circunferencias aproximadamente para explicar los fenómenos conocidos por él; Copérnico tuvo aún que emplear 34. La complejidad del sistema de Ptolomeo había sido aliviada más que curada.

Copérnico envió a sus amigos astrónomos un breve resumen de sus conclusiones bajo el título de *Commentariolus;* pero se sintió cohibido ante la tarea de preparar la obra completa para su publicación, de suerte que transcurrieron 10 años antes de que consintiera en hacerlo. Pero dio autorización a un cierto Georg Joachim (Rheticus), que había dimitido una cátedra de matemáticas de Wittenberg para ir a trabajar con él, para preparar un corto resumen del contenido del libro que se publicó en 1540 con el título *De libris revolutionum narratio prima.* Copérnico, a continuación, prestó el texto de su libro entero a

Rheticus, quien se dedicó a revisarlo y prepararlo para la imprenta. Dícese que la impresión fue terminada con el tiempo únicamente justo para que el autor tomara el libro en su mano cuando yacía, paralizado e inconsciente, en su lecho de muerte.

En su carta dedicatoria al papa explicó Copérnico por qué había vacilado tanto tiempo antes de lanzar sus teorías al mundo: "Tenía yo la idea de que se consideraría como un absurdo cuento de hadas si yo afirmara que la Tierra se movía [...] Las burlas que eran de temer a cuenta de la novedad y absurdidad de esta opinión me impulsaban, por aquella razón, a abandonar el libro que yo había ya redactado".

A pesar de esta afirmación tan clara, con frecuencia se ha dicho que Copérnico guardó su libro por temor a incurrir en el desagrado de la Iglesia. Es difícil hallar alguna prueba de esto. Copérnico no guardó secreto alguno de sus conclusiones, sino que distribuyó su *Commentariolus* entre varios altos dignatarios de la Iglesia; muchos lo instaron a publicar su "revelación de la verdad", y se le concedió autorización para publicar su *Narratio* en más ancho círculo en el año de 1540. En verdad, no sabemos nada acerca de ninguna seria oposición eclesiástica a su libro hasta 1616, cuando fue puesto en el índice, de suerte que se prohibió su lectura a todos los buenos católicos. Pero hacia 1616, muchas circunstancias se habían combinado para crear una atmósfera diferente.

Los luteranos, sin embargo, desde Lutero y Melanchthon[3] para abajo, aborrecieron el libro desde los primeros momentos, y dispararon muchas andanadas de malos argumentos contra él. Posiblemente tenían más aguda visión que la Iglesia oficial al percibir cuán heterodoxas eran las conclusiones de tipo religioso que podían sacarse del sistema copernicano.

Rheticus no había visto el libro impreso, pero entregó las etapas finales a un amigo de Copérnico, pastor luterano, llama-

do Andreas Osiander, el cual no guardó en secreto sus temores de que el libro podía ofender a los luteranos, y había aconsejado que se describieran sus conclusiones solamente como hipotéticas. A Copérnico le escribió lo siguiente: "Por mi parte, he tenido siempre la sensación de que estas [hipótesis] no eran artículos de fe, sino bases de cálculo, de suerte que incluso si fueran falsas, no importa tanto que representen exactamente los fenómenos [...] Por consiguiente, parecería cosa excelente que usted tocara un poco este punto en su prólogo".

Ahora que el manuscrito del libro ha sido descubierto después de haberse perdido por espacio de 250 años, sabemos que Copérnico no hizo caso de este consejo. Pero cuando Osiander recibió el manuscrito de manos de Rheticus, tuvo el asunto en su poder, y el descubrimiento del manuscrito ha demostrado cómo aprovechó su oportunidad. Añadió al título las palabras *orbium coelestium* ("de las esferas celestes"), y de este modo envolvió el libro en una atmósfera ptolemaica o incluso preptolemaica, que falta en el título original. Luego, lo que es mucho peor, suprimió el prólogo original de Copérnico y lo sustituyó con uno de su propia mano con las líneas de su carta antes acotadas, de suerte que cuando el lector abría el libro, se encontraba frente a un prólogo donde se insinuaba que el esquema allí descrito podía no ser el verdadero esquema de la naturaleza, sino meramente una ficción matemática que se adaptaba a las observaciones. Durante algún tiempo después de su publicación parece que hubo algunas dudas respecto de si era aquello todo lo que contenía el nuevo esquema.

Peor que todo esto: Osiander arrancó toda mención a Aristarco; tal como se publicó el libro no contiene ni aun su nombre, resultando de esto que Copérnico ha sido con frecuencia acusado de plagio, e incluso con falta de honradez, como, por ejemplo, por Melanchthon[4] y por Erasmus Reinhold.[5] Y, sin embargo, el manuscrito original contenía no menos de cuatro

referencias a Aristarco, describiéndolo como "uno de los filósofos antiguos que, además de los pitagóricos, consideraron la tierra como un planeta". Podemos suponer que Osiander encontró tan desagradable la idea de una tierra que se mueve, que no pudo tolerar ninguna mención del autor a tal idea.[6]

Después de demostrar que la hipótesis de una Tierra que se mueve estaba de acuerdo con las observaciones, procedió Copérnico a contestar las objeciones que Ptolomeo había presentado a este hecho (p. 115). Fue una de ellas que si la Tierra hiciera un movimiento de rotación completa en un día, estaría siempre azotando de oeste a este un viento terrible, de tal manera que un pájaro que se lanzara al vuelo no podría volver al nido. Naturalmente, Copérnico explicó que el aire acompañaba a la Tierra en su rotación. Ptolomeo había además objetado que una rotación tan veloz de la Tierra haría volar en pedazos todas las cosas. Copérnico alegó que si las revoluciones aparentes de las estrellas respecto de la Tierra fueran resultado de una rotación efectiva de la "esfera de las estrellas fijas", entonces esta esfera estaría más expuesta que la Tierra a volar en pedazos, porque su circunferencia era más grande que la de la Tierra y la velocidad del movimiento sería proporcionalmente mayor. Por último, desde los pitagóricos se había dicho que la Tierra no podía moverse en el espacio, puesto que tal movimiento daría por resultado un movimiento aparente de las estrellas (un movimiento "reflejado" como el que vimos, en el caso del niño que se mueve, en la p. 152). Pero tal movimiento no se veía; el patrón para la situación de las estrellas quedaba inalterable para siempre y las constelaciones no cambiaban sus formas. La contestación de Copérnico a esta cuestión fue que las estrellas se hallan tan inmensamente distantes que el relativamente exiguo movimiento de la Tierra en su órbita no puede producir ninguna diferencia apreciable; "la Tierra y su órbita están, respecto del tamaño del universo, en la misma proporción que un punto

respecto de un bloque o un objeto de dimensiones finitas respecto del infinito". El que Copérnico escribiera argumentos de este género demuestra que pensaba, y pretendía probarlo, que la Tierra estaba verdaderamente girando sobre sí misma y a la vez moviéndose en el espacio; su esquema no era una simple "base de cálculo". Esto quedó también en claro en su dedicatoria al papa, en la cual habla de sus "comentarios presentados como prueba de este movimiento" de la Tierra alrededor del Sol.

Con esta refutación de los argumentos de Ptolomeo, Copérnico había probado su caso, al menos para los pocos que podían captar rectamente sus argumentos. El hombre ya no podía proclamar que su morada estaba fija en el centro del universo y todo lo demás girando a su alrededor, sino que era uno de los más pequeños planetas, y que, como los demás, marchaba en movimiento de revolución alrededor de un Sol de magnitud mucho mayor. Si hasta entonces había creído que, como hombre, era culminación y corona de toda la creación, ahora se le asignaba en el espacio una morada totalmente inconmensurable en relación con su importancia; morada que ciertamente estaba "en la misma proporción respecto del universo que un punto lo está respecto de un bloque de materia". Verdad es que Copérnico había dado estimaciones patéticamente equivocadas de las magnitudes relativas de la Tierra, el Sol y de la órbita de la Tierra alrededor de éste; pero incluso así, el principio general permanecía claro e inatacable: vivimos sobre una partícula de polvo.

Conclusiones tales pudo esperarse que produjeran gran conmoción en la cabeza de los pensadores; mas durante algún tiempo nada de esto sucedió. La razón estaba en parte en que Copérnico no sólo había probado su teoría, sino que la había hasta perjudicado por exceso de elaboración. La fuerza real de ella está en la majestuosa sencillez de la idea central; una Tierra

en movimiento en lugar de un Sol en movimiento: Copérnico había de tal modo recargado con detalles esta idea central, que su ventaja principal parecía ser la reducción de los 80 círculos de Ptolomeo a 34: reducción en grado pero no en género. Difícilmente podía esperarse que el hombre corriente aceptara idea tan revolucionaria del universo; idea, además, de tal naturaleza, que trastornaba sus convicciones más profundamente arraigadas y violaba sus sentimientos religiosos, meramente porque cambiaba 80 por 34.

Sólo unos pocos matemáticos y astrónomos expresaron su confianza en la nueva estructura del mundo, en tanto que la mayor parte de las gentes permanecieron hostiles o indiferentes hasta que el telescopio de Galileo comenzó a proporcionar confirmación visual de ella unos 66 años después. Incluso entonces, uno de los colegas de Galileo se negó a mirar por el telescopio, apoyándose para ello en que no veía razón ninguna para oponerse a una cuestión que había sido ya fijada por Aristóteles. Fue este caso una excepción, pero muchos plantearon genuinas objeciones a las nuevas doctrinas basadas en el terreno religioso. El gran astrónomo Kepler (p. 193), convencido partidario de Copérnico, escribió lo siguiente: "Hay que confesar que son muchos los que, entregados a la vida devota, disienten del juicio de Copérnico, temiendo que si dijeran que la Tierra se mueve y el Sol está inmóvil fuera como si pasaran lejía que borrara las manifestaciones del Espíritu Santo en las Escrituras".[7] Aun en 1669, el año en que Newton se hizo profesor en Cambridge, la universidad agasajó a Cósimo de Médici con una disertación contra la astronomía de Copérnico.[8] Y en el siglo XVIII, Cassini (1625-1712), director del gran Observatorio de París, y uno de los astrónomos más influyentes de su tiempo, se manifestó como convencido antagonista de Copérnico, en tanto que la Universidad de París enseñaba que la doctrina de Copérnico era una hipótesis conveniente pero falsa. Durante con-

siderable tiempo las nuevas universidades de Yale y de Harvard enseñaron los sistemas de Ptolomeo y de Copérnico paralelamente, significando con ello que eran igualmente defendibles. Hasta el año de 1822 no dio permiso formal la Iglesia romana para que se enseñara el sistema de Copérnico como la verdad, y no como simple hipótesis.

Tycho Brahe (1546-1601). El 14 de diciembre de 1546, tres años después de la muerte de Copérnico, nació Tycho Brahe, el siguiente gran astrónomo de aquel periodo. En muchos aspectos fue la antítesis de Copérnico. Este último había sido gran matemático y gran teórico; pero deleznable observador; Tycho era flojo como matemático y teórico, pero era gran observador: uno de los más grandes, y acaso el más grande de todos los tiempos, en relación, naturalmente, con el equipo de que se podía disponer.

Era danés, hijo de noble danés, aunque el lugar de su nacimiento, Knudstrup, en Escania, pertenece ahora a Suecia. Un eclipse solar que acaeció el 21 de agosto de 1560, cuando era estudiante en la Universidad de Copenhague, le causó gran impresión y le infundió vivo interés por la astronomía, de suerte que empezó a estudiar las obras de Ptolomeo e intentó hacer observaciones sencillas con toscos instrumentos de su propia factura. Después de estudiar matemáticas y astronomía en las universidades de Leipzig, Wittenberg, Rostock y Basilea, hizo un viaje por Europa y se entrevistó con el Landgrave de Hesse, que era un astrónomo entusiasta. El Landgrave debió de quedar impresionado de la capacidad de Tycho, porque convenció al rey de Dinamarca Federico II para que tomara al joven astrónomo bajo su real patrocinio. Como debida consecuencia, Federico concedió a Tycho una pensión anual y la isla de Huen en los estrechos entre Copenhague y Elsinor, en la cual él mismo construyó un observatorio y una casa para vivir. Instaló allí el famoso observatorio que llamó Uraniborg, amueblado tan

magníficamente y tan suntuosamente equipado, que su modesta pensión resultó pronto inadecuada, y tuvo que completarse con concesiones posteriores del rey.

Cuando murió Federico, en 1588, quedaron reducidos los ingresos de Tycho y abandonó Uraniborg en 1597. Dos años después, el emperador de Alemania Rodolfo II lo invitó a ir a Praga y le concedió una pensión y un castillo para usarlo como observatorio. Pero la vida útil de Tycho había terminado y antes de que emprendiera un trabajo serio enfermó de modo repentino y murió el 24 de octubre de 1601.

Tycho se opuso a las doctrinas de Copérnico porque juzgaba contrarias tanto a la física pura como a las terminantes palabras de las Escrituras que la imponente Tierra sólida se moviera en el espacio. Influyó también en él la antigua objeción de Ptolomeo de que las estrellas no cambiaban su posición relativa en el firmamento, como habrían de hacerlo si la Tierra estuviera en movimiento.

Y, en consecuencia, se puso a la obra para perfeccionar el sistema de Ptolomeo de acuerdo con sus propias ideas. Situó la Tierra en el centro de su universo y la esfera aristotélica de las estrellas fijas como su límite exterior; el Sol seguía circulando alrededor de la Tierra; pero (y he aquí la principal novedad) los otros planetas, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, todos ellos giraban alrededor del Sol en epiciclos. Esta disposición se muestra en la figura V.1. presenta el mismo movimiento aparente para el Sol, la Luna y los planetas que los sistemas de Copérnico y de Ptolomeo en sus formas más simples, de suerte que la observación no podía decidir entre ambos. Pero el sistema de Tycho no representa parte seria en la historia de la ciencia, porque todos los posteriores progresos de la astronomía los hicieron adeptos a la cosmología de Copérnico.

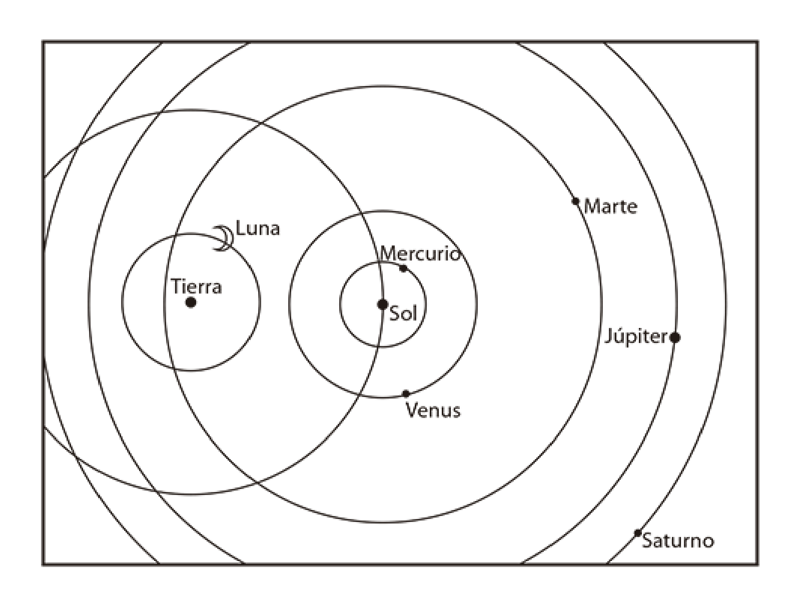


FIGURA V.1.

El verdadero servicio de Tycho a la astronomía fue como observador más que como teórico; introdujo en la astronomía un nuevo tipo, llegando a esto por dos caminos: empleando mejores instrumentos y mejores métodos. Puede parecer cosa fácil alcanzar gran exactitud haciendo mayores los instrumentos; pero en verdad, la cosa no es tan sencilla como parece. Cuanto mayor es un instrumento, más se encorva bajo su propio peso, y pronto se llega a un punto en que la curvatura no compensa las ventajas conseguidas por el aumento de tamaño del instrumento. Tycho pudo emplear instrumentos más grandes porque eran de nuevo diseño, planeados especialmente para salvar tal dificultad. Consiguió incluso un mayor adelanto en los métodos de observación. Los astrónomos anteriores se habían contentado con referencias a la mejor observación que podían hacer; sin duda que adolecería de algún pequeño error, pero esto era inevitable en un mundo imperfecto. Tycho cayó en la conveniencia de hacer gran número de observaciones, todas de igual clase, y luego promediar los resultados; los errores acci-

dentales quedaban entonces también sujetos a promediarlos a su vez.

Usando estos métodos Tycho determinó las constantes de astronomía más importantes con mayor exactitud, e hizo nuevas determinaciones de posiciones estelares, dadas a conocer en su catálogo de estrellas de 1602. Probablemente lo mejor que hizo fue la observación repetida de las posiciones de los planetas, no porque se haya hecho uso de ello, sino por lo que representaron en progresos posteriores. El manejo de estas observaciones lo pasó a Johannes Kepler, ayudante que había contratado poco antes de su muerte, con resultados que más adelante veremos. Pero la labor de Tycho fue más de perfeccionar lo existente que de descubrir cosa nueva; desempeña papel importante en la historia de la técnica astronómica, pero figura poco en la historia del pensamiento.

A pesar de todo, algo de su obra sobrepasó los meros problemas técnicos de astronomía. En la noche del 11 de noviembre de 1572 observó un nuevo cuerpo brillante en la constelación de Casiopea. Sabemos ahora que debía ser una *nova,* o estrella nueva; estos cuerpos aparecen a muy frecuentes intervalos, inflamándose súbitamente y disminuyendo de manera gradual su brillo hasta oscurecerse. Pero aquello fue para Tycho "verdaderamente un milagro, o el más grande de cuantos habían acaecido en todo el ámbito de la naturaleza desde el principio del mundo, o uno que ciertamente debía de clasificarse entre los señalados por los Sagrados Oráculos, la detención del Sol en su carrera en respuesta a las plegarias de Josué, y el oscurecimiento de la faz del Sol en el momento de la crucifixión".[9]

Si este nuevo cuerpo hubiera pertenecido al sistema solar, se habría visto moviéndose sobre el fondo de las estrellas fijas, como lo hacen los planetas. Como Tycho no observó tal movimiento, llegó a la conclusión de que el cuerpo debía pertenecer a la "esfera de las estrellas fijas"; en resumen, debía ser una es-

trella. Los aristotélicos habían enseñado que todas las cosas que estaban en aquella región exterior del espacio eran perfectas y, por consiguiente, inalterables. “Todos los filósofos están de acuerdo, y los hechos prueban claramente que éste es el caso, que en la región etérea del mundo celeste ningún cambio tiene lugar, sea por generación o por corrupción; y los cielos y los cuerpos celestes que están en los cielos no sufren aumento ni disminución, y no pasan por alteración ninguna.”[10] Tycho, habiendo mostrado por observación directa que aquellas regiones no eran más inmunes a cambios que las regiones más cercanas a la Tierra, asestó un golpe destructor a la cosmología aristotélica.

Giordano Bruno (1547-1600). Los prominentes hombres de ciencia de estos pocos siglos en los que nos acabamos de ocupar, fueron principalmente eclesiásticos, y en su mayor parte ocuparon elevadas posiciones; es probable que esto no sorprenda a nadie, puesto que el saber y la enseñanza estaban alojados casi exclusivamente en la Iglesia. El hombre de ciencia de quien vamos a tratar ahora fue de tipo muy diferente.

Giordano Bruno había nacido en Nola, cerca de Venecia, en 1547, y entró en la orden de dominicos a la edad de 15 años. Era un hombre de espíritu independiente, agresivo, intolerante y turbulento, con más de un rasgo de cómico de la legua y charlatán en su actitud, de suerte que podremos imaginar bien que fue causa de perturbación para sus superiores monásticos. Habiendo tenido noticia de que estaba bajo sospecha de herejía en los temas de la transustanciación y de la inmaculada concepción, huyó de Italia para viajar por Francia, Inglaterra, Alemania y Suiza. Después de haber dado enseñanzas en las universidades de Lyon, Tolosa, Montpellier y París sucesivamente, por último fue a Londres en 1583. Allí publicó tres pequeños libros en italiano con fingido pie de imprenta veneciano, uno de los

cuales, *Dell' infinito Universo e Mondi* ("Sobre el universo infinito y sus mundos"), es de especial interés.

En filosofía Bruno tenía algo de panteísta. Veía la naturaleza como un mundo de vida y de belleza, lleno de actividad y divinidad latente. Y de igual manera que nada hay finito referente a Dios, tampoco hay nada finito respecto del universo. He aquí lo que escribía: "Me ha parecido indigno de la bondad y poder divinos la creación de un mundo finito, capaz como era de producir además otro y otros sinfín, de suerte que he declarado que hay sinfín de mundos particulares semejantes a nuestra Tierra; con los pitagóricos tengo a ésta como una estrella, y parecidos a ella son la Luna, los planetas y otras estrellas, las cuales son infinitas en número, y todos estos cuerpos celestes son mundos". En otro lugar explica que cada mundo gira alrededor de su propio Sol.

De esta manera, Bruno llevó la astronomía más allá del sistema solar, e introdujo el moderno modo de pensar sobre el sistema de las estrellas. Estaba hollando el camino que había sido abierto por Nicolás de Cusa y por Copérnico, pero fue incomparablemente más revolucionario que uno y otro. Desplazó del centro del universo no sólo a la Tierra sino también al Sol; de hecho, no dando ya lugar a ningún centro, porque "como el universo es infinito, no puede decirse con propiedad que haya ningún cuerpo que esté en el centro del universo, ni tampoco en sus fronteras". La morada del hombre en el espacio no ocupa ninguna posición preferente, no podía tampoco esperar ningún trato preferente; todos los planetas tienen movimiento de revolución alrededor de soles, todos de la misma condición; todo era prueba evidente de la bondad de Dios, y a veces pensaba que todo era Dios.

La Iglesia había pasado por alto las doctrinas revolucionarias de Copérnico sin mostrar ninguna desaprobación activa, pero esta nueva revolución afectaba a sus intereses mucho más de

cerca. La religión nada significaba, a menos que el Creador fuera distinto de su creación; Bruno estaba predicando que eran idénticos. Era esencial para la Iglesia que hubiera donde poner un cielo y un infierno; había situado el infierno en el interior de la Tierra y el cielo más allá de la "esfera de las estrellas". El nuevo cosmos de Bruno no dejaba sitio para un cielo material. Las doctrinas de Copérnico no exigían la reformulación de ninguna de las doctrinas fundamentales de la religión; las nuevas doctrinas de Bruno la exigían de varias, a menos que Dios fuera a convertirse en un simple dios de tribu para el planeta Tierra. Aunque viviera el hombre en un planeta que se mueve, podía ser todavía el centro del interés de Dios, la principal preocupación de su Creador; las doctrinas de Bruno implicaban entonces que había otros infinitos mundos del mismo género, los cuales podían compartir el interés del Creador. Todo esto era demasiado antagónico a las doctrinas establecidas por la Iglesia para que pudiera pasar en silencio.

Bruno fue tan imprudente que volvió a Italia en 1593, y la Inquisición se enteró de que estaba allí. Lo capturaron, lo metieron en prisión por espacio de siete años y, por último, lo sometieron a juicio para que respondiera de varios cargos. Al fin se pronunció la sentencia: debía ser "castigado con toda la clemencia posible y sin derramamiento de sangre", una fórmula que en la práctica significaba morir quemado en la hoguera. Dícese que Bruno, al oír su sentencia, hizo el siguiente comentario a sus jueces: "Acaso vosotros que me condenáis tembláis más que yo que soy el condenado". Hay quienes consideran que este juicio y esta condena constituyen uno de los más vergonzosos incidentes en la historia de la Iglesia; otros nos recuerdan que no sabemos totalmente en qué se fundaba la condena de Bruno, puesto que no era práctica empleada por la Inquisición dar a la publicidad los fundamentos en que se apoyaba una sentencia. Seguramente fue acusado de algo más que de opiniones

científicas heterodoxas; él había negado las doctrinas de la transustanciación y de la inmaculada concepción, y había escrito un folleto, *Sobre el triunfo de la bestia,* en el cual se asignaba al papa lo que el título significa.

De esta manera murió Bruno, y después sólo pudo influir en el pensamiento humano por medio de los pobres escritos que dejó tras de sí. Las probabilidades parecían escasas, pero lo improbable aconteció. En el mismo año de su muerte salió a luz otro libro en el cual se exponían los mismos puntos de vista, no ya por un fraile oscuro, sino por un autor de autoridad y posición social, William Gilbert (1540, o acaso 1544 o 1546 a 1603), el médico personal de la reina Isabel de Inglaterra. El libro, *De magnete,* trata principalmente de física y se ha hecho verdaderamente famoso como una de las piedras angulares sobre las cuales se ha edificado la moderna ciencia eléctrica. Pero su capítulo último describe un hipotético esquema del universo; es el esquema de Bruno, aunque su nombre no se menciona en ninguna parte del libro. Esto pudiera explicarse como si dos cabezas hubieran tenido el mismo pensamiento; pero en 1651 salió a luz un libro póstumo del mismo autor,[11] en el cual se exponen las mismas ideas que en el libro anterior, pero en este caso atribuidas definidamente a Bruno. De esta manera y de otras semejantes siguió viviendo el espíritu de Bruno, y en su propio tiempo produjo incluso mayores cambios en el pensamiento que las hipótesis de Copérnico.

En 1600, año que cerraba el siglo, el año en que murió Bruno y se publicó *De magnete,* el año en que nació la ciencia eléctrica, es una piedra miliar, por lo cual, y para cerrar el presente capítulo, debemos en primer lugar referirnos a los desarrollos que tuvieron lugar hasta este momento en otras ciencias distintas de la astronomía.

El siglo xvi produjo también notorios adelantos en mecánica, que había progresado muy poco desde la época de Arquímedes. Quedó entonces establecida sobre base firme, en gran parte por las investigaciones de dos individuos: el flamenco Stevin, de Brujas, y el italiano Galileo Galilei. Aunque eran casi contemporáneos, trabajaron los dos independientemente, y sus resultados se complementaron formando una base sólida para una nueva ciencia de la mecánica. Stevin se interesó principalmente por la mecánica de los cuerpos en reposo (estática) y Galileo especialmente por la mecánica de los cuerpos en movimiento (dinámica).

Estática

Stevin (1548-1620). Era un ingeniero de alta categoría en el ejército holandés. Su más notable éxito fue el descubrimiento de la ley que ahora llamamos *paralelogramo de fuerzas*.

Es raro que haya algún cuerpo sometido a la acción de una sola fuerza; lo más corriente es que haya varias fuerzas trabajando al mismo tiempo. Una hoja que cae, por ejemplo, está bajo la actuación de la atracción gravitatoria de la Tierra (el "peso" de la hoja), por la resistencia del aire, y probablemente también por la fuerza del viento. Si sólo interviniera su peso caería verticalmente al suelo; pero si a ello se añade la presión de un viento del este, será empujada hacia el oeste y caerá más hacia el oeste que hacia donde lo habría hecho en otro caso. Y ahora sobreviene la pregunta: ¿cuánto más apartada? O, en términos más generales, ¿cómo podremos estimar el efecto combinado de dos o más fuerzas cuando actúan a la vez?

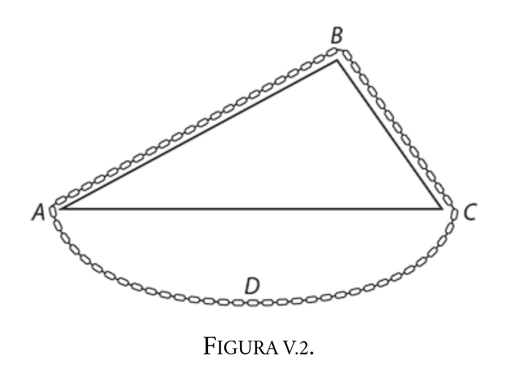


FIGURA V.2.

Stevin no hizo ningún experimento para hallar la respuesta, pero pensó en un experimento ideal cuyo resultado podía preverse con facilidad. Imaginó una cuña como *ABC* en la figura V.2., que se había de sujetar fuertemente por el lado horizontal *AC,* envuelta en una cadena sinfín *ABCD.* Sin necesidad de experimentar, sabía Stevin que la cadena quedaría colgando y en reposo como está en el dibujo. Porque la única alternativa que se podía concebir era el movimiento perpetuo, y desde los griegos hasta Leonardo había llegado a ser un lugar común en la ciencia que tal cosa era imposible.

Stevin en seguida dedujo (esta vez por intuición y no mediante razonamiento ni experimentación) que la parte colgante de la cadena, *ADC,* podía quitarse sin alterar el equilibrio del resto. Si esto se hiciera, los trozos *AB, BC* de la cadena permanecerían en equilibrio. Como los pesos de esos trozos están en proporción de sus longitudes, Stevin sacó la deducción de que dos cuerpos cualesquiera que descansaran en las caras *AB* y *BC,* si se unían con una cuerda, quedarían en equilibrio siempre que sus pesos estuvieran en la relación misma que las longitudes *AB* y *BC.* Por consecuencia, por simple razonamiento matemático se deduce una regla para determinar el efecto de dos fuerzas que actúan simultáneamente sobre el mismo objeto. La regla es como sigue:

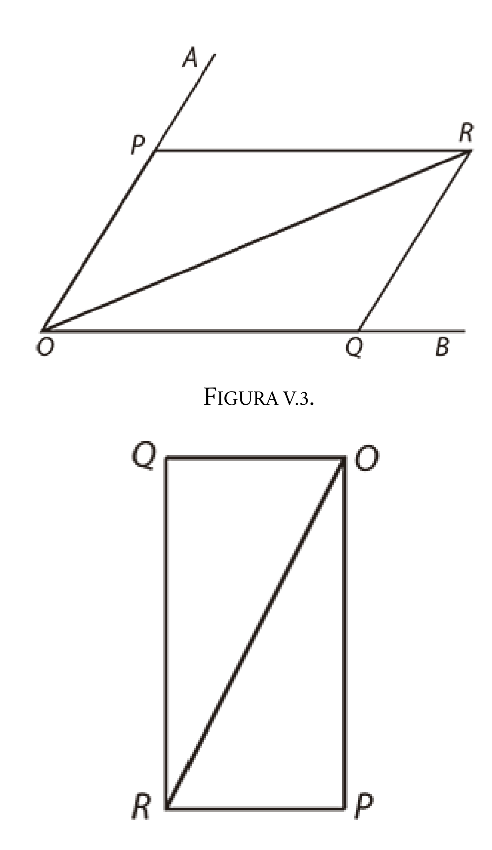


FIGURA V.3.

FIGURA V.4.

Supongamos que dos fuerzas actúan simultáneamente sobre un objeto en un punto *O,* y que actúan en las direcciones *OA, OB* de la figura v.3. En las líneas *OA, OB* cortamos longitudes *OP, OQ* proporcionales a las intensidades de las dos fuerzas, y completamos el paralelogramo *OPQR.* Entonces la regla nos dice que las dos fuerzas producen el mismo efecto que una sola fuerza de intensidad proporcional a la longitud *OR,* actuando en la dirección de *OR.*

Si, por ejemplo, *OP,* en la figura v.4., representa el peso de una hoja que cae, y *OQ,* en la misma escala, representa la fuerza del viento sobre la hoja, entonces ésta caerá como si actuara sobre ella una sola fuerza proporcional a *OR.*

Este ingenioso argumento se apoyaba en una mezcla de conocimiento experimental (el de la imposibilidad de movimiento continuo), de intuición y de suposición. Esto tenía importancia en dos aspectos: aclaraba la idea de un cuerpo sometido a la acción simultánea de varias fuerzas y aportaba un resultado que fue indispensable para el progreso de la ciencia mecánica.

También Stevin enunció el principio de los *desplazamientos virtuales,* que se expresa vulgarmente diciendo que "lo que se gana en velocidad se pierde en fuerza". Esto se aplica de modo especial a los problemas de poleas y palancas. Supongamos que un punto en movimiento, en un sistema mecánico, por ejemplo, un extremo de un balancín, ha recorrido una distancia *x,* hallaremos que otro punto del sistema, por ejemplo, el otro extremo del balancín, ha recorrido una distancia *y.* Entonces el principio establece que las fuerzas *X* e *Y* cuando se aplican a estos dos puntos se equilibran si sus intensidades están en la relación de *y* a *x.* Por ejemplo, si dos muchachos que pesan 39 y 45 kilogramos respectivamente, se balancean en un balancín, sus distancias al pivote deben estar en la relación de 45 a 39. Este principio no era un nuevo descubrimiento de Stevin, porque ya lo conocieron vagamente Aristóteles y Arquímedes y, en forma diferente, Leonardo.

Dinámica

Todo lo explica Stevin en un libro que publicó en 1586 bajo el título *Estática e hidrostática,* y además describe cómo él y Grocio habían experimentado sobre la caída de cuerpos por la fuerza de gravedad y hallaron que cuando un cuerpo ligero y otro pesado caían desde la misma altura tardaban igual tiempo en llegar al suelo. Esto era contrario a la física de Aristóteles, el cual había enseñado que los cuerpos eran ligeros o pesados por su naturaleza intrínseca, y que todas las sustancias tenían su puesto natural en el universo, el cual se esforzaban en alcanzar

con grado variable de éxito, de suerte que los cuerpos pesados caían y los cuerpos ligeros se elevaban con velocidades dependientes de su ligereza o su pesantez. Aristóteles habría afirmado que varios cuerpos de diferentes sustancias no llegarían al suelo al mismo tiempo; Stevin y Grocio probaron entonces que llegaban al mismo tiempo.

Galileo (1564-1642). Todo esto era muy importante; pero la contribución de Galileo lo fue aún mucho más. Galileo Galilei nació en Pisa el 18 de febrero de 1564, el mismo día en que murió Miguel Ángel, siendo su padre un noble empobrecido cuyas principales ocupaciones fueron la música y las matemáticas. Se educó en el monasterio de Vallombrosa, donde podemos asegurar que recibió una educación aristotélica convencional; estudió griego, latín y lógica; pero mostró desafecto a la ciencia. Entonces, sus colegas más antiguos le aconsejaron que entrara como novicio en la Orden, y su padre, dudoso de este consejo, lo envió a la Universidad de Pisa a estudiar medicina. Una conferencia sobre geometría, que oyó por casualidad, lo convenció de que las matemáticas eran mucho más interesantes que la medicina; dícese que se pegaba a la puerta del aula de matemáticas tratando de captar algunas migajas del saber que allí se comunicaba. Cuando las autoridades universitarias supieron esto, lo trasladaron desde la clase de medicina a la de matemáticas y ciencias. En 1585 tuvo que dejar la universidad por falta de medios económicos y volvió a Florencia, donde dio conferencias y consiguió tal reputación científica, que se le nombró para una cátedra en su antigua Universidad de Pisa, a la temprana edad de 25 años. Pero de espíritu independiente, su temperamento sarcástico y la acritud de su expresión pronto lo hicieron impopular para todos aquellos cuyas opiniones diferían de las suyas. Ocupó su cátedra sólo durante dos años, al cabo de los cuales fue nombrado profesor de matemáticas en Padua, puesto que conservó durante los 18 años siguientes.

En Pisa se puso a trabajar para descubrir los verdaderos principios de mecánica, convencido hacía largo tiempo de que las doctrinas convencionales aristotélicas sobre esta materia eran erróneas. Empezó por dejar caer cuerpos de diferentes pesos desde la misma altura (según se cuenta, desde lo alto de la torre inclinada de Pisa), para comprobar la doctrina aristotélica de que diferentes cuerpos caen a diferentes velocidades, y encontró que una bala de cañón y una bala de mosquete tardaban el mismo tiempo en caer, lo cual era confirmación del resultado que habían obtenido Stevin y Grocio en Delft. He aquí una prueba concluyente de que algo erróneo había en la mecánica de Aristóteles; Galileo se puso a la obra para hallar dónde estaba este error.

La velocidad de un objeto que cae, evidentemente aumenta durante la caída, como Leonardo había proclamado, y Galileo trató ante todo de hallar la ley a que obedecía este aumento. Su primera suposición fue que en cada momento la rapidez podía ser proporcional a la distancia recorrida por el cuerpo en su caída; pero muy pronto encontró que si fuera esto la verdadera ley, un cuerpo jamás comenzaría a caer; podría literalmente quedar suspendido en el aire sin caer en absoluto. Después supuso que la velocidad de cada instante podía ser proporcional al tiempo transcurrido desde que el cuerpo quedó libre y se puso a la obra de probar esta suposición. Naturalmente, no había esperanza de poder medir directamente ni la velocidad ni el tiempo invertido en la caída. Pero Galileo pensó que si esta suposición estaba sólidamente fundada, entonces la velocidad en cada punto sería exactamente el doble de la velocidad media hasta este punto, y esta velocidad media podría obtenerse dividiendo la distancia recorrida en la caída por el tiempo invertido en ella. En teoría, por consiguiente, Galileo pudo probar su suposición midiendo los tiempos invertidos por un objeto que caía desde diferentes alturas. No obstante ¿cómo se arregló pa-

ra medir tan cortos periodos de tiempo, cuando los únicos métodos conocidos para medir el tiempo eran por medio de relojes de Sol, por velas encendidas o lámparas de aceite, por relojes de arena y clepsidras, y por muy toscos relojes mecánicos?

Galileo mejoró la clepsidra de manera muy ingeniosa, dejando que el agua cayera a gotas en un recipiente y pesando luego la cantidad que había caído con gran exactitud, pero los tiempos por medir eran todavía incómodamente cortos. En vista de esto, Galileo redujo la velocidad en sus experimentos sustituyendo la caída lenta por un plano poco inclinado en lugar de la caída vertical, en la creencia de que ambos casos obedecen a la misma ley, como verdaderamente ocurre. Utilizó un tablón de unas 12 varas de longitud, en plano levemente inclinado, e hizo deslizarse por una estrecha ranura tallada en aquél unas bolas de acero pulimentado. Con este sencillo aparato fue capaz de comprobar sus suposiciones de que la velocidad de la caída crecía de modo uniforme con el tiempo (ley del movimiento "uniformemente acelerado"). Fue éste uno de los grandes momentos de la historia de la ciencia.

Porque entonces se puso en claro que el efecto de una fuerza no era *producir* movimiento, sino cambiar el movimiento, para producir aceleración, y un cuerpo sobre el cual no actúa ninguna fuerza se mueve con velocidad uniforme.

Los aristotélicos habían enseñado que todo movimiento necesita de una fuerza para mantenerlo, de suerte que un cuerpo sobre el cual no actúa ninguna fuerza por necesidad quedaba en reposo. De acuerdo con esto, el mismo Aristóteles había introducido su Motor Inmóvil (p. 63), Dios mismo, para mantener los planetas en movimiento, en tanto que los teólogos medievales pretendieron que había relevos de ángeles para el mismo propósito. Ahora resultaba que para mantener un cuerpo en movimiento sólo era necesario dejarlo abandonado a sí mismo; un cuerpo sobre el cual no actuara ninguna fuerza no que-

daría, en general, en reposo, sino que se movería con velocidad uniforme en línea recta, porque no habría nada que le hiciera variar su movimiento. Galileo comprobó esto dejando que sus bolas de acero, después de rodar por todo el plano inclinado continuaran su movimiento en plano horizontal; se movían con velocidad constante hasta que eran detenidas por la fricción y la resistencia del aire.

Esta última observación ya no era enteramente nueva; porque era demasiado sencilla y evidente. Otros habían notado que una bola que rueda continúa su movimiento durante algún tiempo, pero habían aducido que esto era prueba de lo natural que es el movimiento circular: una esfera que rueda persiste en su movimiento porque cada partícula de ella se mueve en un círculo; pero si el cuerpo que rueda fuere irregular en su forma, de suerte que entonces el movimiento circular se hiciere imposible, el movimiento cesaría prontamente.

Tampoco era nueva la idea de que el movimiento tendía a persistir en ausencia de toda fuerza. Hemos visto que Leonardo había declarado que "todo cuerpo tiene peso en el sentido en que se mueve", mientras que Plutarco había expuesto la cosa con más claridad cuando escribió (100 d. C.) que toda cosa se mueve con movimiento natural si no hay otra cosa que la desvíe.[12] Pero fue Galileo el primero que determinó experimentalmente este principio; donde otros habían supuesto, Galileo probó.

No obstante, cosa bastante extraña, nunca enunció el principio con perfecta claridad. Acaso fue Descartes el primero en hacerlo cuando escribió lo siguiente (1644): "Cuando un cuerpo está en reposo tiene poder para permanecer en reposo y de resistir a todo cuanto pudiera cambiar ese estado. De manera semejante, cuando está en movimiento, tiene el poder de continuar en movimiento con la misma velocidad y en la misma dirección". Treinta años después, Huygens lo reafirmó en la for-

ma siguiente: “Si la gravedad no existiera, ni la atmósfera obstruyera el movimiento de los cuerpos, un cuerpo mantendría para siempre, con movimiento uniforme y en línea recta, el movimiento que se le ha impuesto”.[13] En 1687, Newton lo reafirmó nuevamente en sus *Principia* (p. 223) y lo convirtió en fundamento de su sistema total de dinámica. Pero, en justicia, la gloria de haber descubierto la ley que había de revolucionar toda la ciencia mecánica corresponde a Galileo y a sus experimentos.

Inmediatamente después Galileo se puso a estudiar cómo un cuerpo se moverá cuando se apliquen a él fuerzas en dirección diferente a la de su movimiento; un proyectil que se mueve en el aire actuando sobre él la gravedad, es un claro ejemplo. Galileo probó que si la resistencia del aire fuera despreciable, entonces el trayecto de cada proyectil sería una parábola, una de las secciones cónicas a las cuales dedicaron los griegos tan paciente labor; estas curvas entraban entonces de nuevo en la ciencia como partes esenciales del gran plan de la naturaleza, y no como meras abstracciones de los matemáticos.

En este caso la resistencia del aire no era despreciable y Galileo no supo cómo considerar su cuantía. Pero en el problema que estudió inmediatamente después, la resistencia del aire era demasiado ligera para introducir complicaciones. En sus primeros días, en Pisa, había observado la lámpara colgando del techo de la catedral, balanceándose por causa del viento, y notó que una pequeña oscilación empleaba el mismo tiempo que una grande. En este caso no tuvo más reloj que su propio corazón, y había medido el tiempo de las oscilaciones tomándose el pulso. Entonces confirmó estas sumarias observaciones mediante experimentación exacta en su laboratorio. No sólo la duración de las oscilaciones de un péndulo era igual con oscilaciones grandes o pequeñas, sino que probó, asimismo, que igual ocurría cualquiera que fuere el material de que estaba hecha la masa os-

cilante. Siendo iguales todas las demás condiciones, una bola de plomo oscilaba a cada lado en el mismo tiempo que una bola de corcho. Esto demostraba que la gravedad actuaba con igual energía sobre todas las sustancias para acelerar su caída.

Posteriormente, Galileo comprendió que esta propiedad de las oscilaciones de un péndulo haría posible la construcción de un reloj que midiera el tiempo mejor que los toscos instrumentos entonces en uso. La principal dificultad estaba en idear algún medio de mantener el movimiento del péndulo, posiblemente por el empuje de alguna fuente de fuerza externa, como, por ejemplo, un peso que cae. Pensó Galileo que había resuelto el problema; pero jamás construyó tal reloj, ni lo construyeron tampoco su hijo Vincenzio ni su discípulo Viviani, a quienes dio instrucciones; el primero que lo hizo fue Huygens, quien patentó su invento en 1657, y lo describió en su *Horologium oscillatorium* (1673).

Sólo dos de las cinco partes de este famoso libro tratan directamente con relojes; el resto contiene mucho que era nuevo en mecánica general. Lo más importante de su contenido es su estudio de la llamada *fuerza centrífuga:* la fuerza que un peso, atado con una cuerda, al que hacemos dar vueltas, ejerce sobre la cuerda que sujetamos con la mano. Huygens demostró que la fuerza centrífuga en general es proporcional al cuadrado de la velocidad del cuerpo en movimiento e inversamente proporcional al diámetro de la circunferencia que describe el cuerpo. Su cuantía por unidad de masa está expresada en la fórmula bien conocida $F = v^2/r$, que Newton empleó para calcular la fuerza de gravitación que el Sol debe ejercer sobre un planeta para contrarrestar la fuerza centrífuga y mantener el planeta moviéndose en órbita circular.

De esta manera y de otras semejantes fue asentada en sólida base la mecánica de los cuerpos sólidos, la parte estática principalmente por Stevin y la parte dinámica por Galileo.

La misma historia se repitió en la mecánica de los fluidos, la cual, cuando Stevin y Galileo aparecieron en escena, seguía en su mayor parte donde la dejó Arquímedes.

Los aristotélicos habían dicho que la forma de un cuerpo determinaba si había de sumergirse o flotar en el agua; una aguja, por ejemplo, o una hoja, flotaban, mientras que una esfera o un cubo se sumergían. Arquímedes conoció algo mejor que esto; su famoso experimento con la corona había dependido de la densidad o *peso específico* del metal, y Arquímedes comprendió que era éste y no su forma lo que determinaba si un objeto debía flotar o sumergirse. Para los árabes fue familiar esta idea, y habían determinado los pesos específicos de cierto número de sustancias.

Galileo entonces realizó un experimento magníficamente sencillo que fijó la cuestión de una vez y para siempre. Puso una bola de cera sumergida en el fondo de una vasija llena de agua, y luego aumentó la densidad del líquido añadiéndole sal. Cuando la densidad llegó a determinado valor, se vio que la bola de cera se elevó y quedó flotando en la superficie del líquido. Por consiguiente, un cuerpo no se hundía o flotaba según su forma, sino de acuerdo con la relación entre su densidad relativa al fluido en que estaba sumergido.

Stevin entonces estudió las condiciones en el interior de una masa de fluido. Las sustancias fluidas pueden dividirse, en sentido amplio, en viscosas (o pegajosas), como el alquitrán o la melaza, y en líquidos no viscosos, como el agua o el vino. Los fluidos de este último género no tienen fuerza de cohesión, de lo cual se puede deducir que, si el líquido está en reposo, debe existir en cada punto de él una presión perfectamente definida, siendo esta presión la fuerza ejercida por el líquido sobre una unidad de área de la superficie, independientemente de la posi-

ción del área. Esta idea de una presión definida en cada punto la introdujo en la ciencia Arquímedes y la resucitó Leonardo. Stevin demostró luego que la presión en cualquier punto de un líquido no viscoso perfecto dependería únicamente de la altura del líquido sobre dicho punto, de suerte que sería la misma, por ejemplo, en los puntos cualesquiera que estuvieran 10 pies bajo la superficie del mar. Esta ley aportaba una sencilla explicación de la llamada *paradoja hidrostática,* que dice: "la presión de un líquido sobre el fondo de la vasija que lo contiene depende únicamente del área del fondo de la vasija y de la profundidad desde la superficie del líquido, pero no depende de la forma de la vasija". Stevin probó la exactitud de estas leyes poniendo una placa ajustada contra el fondo de la vasija y midiendo el esfuerzo requerido para levantar la placa contra la presión del agua contenida en la vasija. Experimentando con vasijas de diferentes formas, comprobó Stevin el resultado dicho. Si se emplea una vasija terminada en un cuello largo y estrecho, como la de la figura V.5., un peso de agua muy ligero puede ejercer una presión muy grande; observó Stevin que una libra de agua podía en tal manera ejercer una presión igual al peso de 100 000 libras de agua. Éste es el principio utilizado en la "prensa hidráulica" y en los frenos hidráulicos de los automóviles.

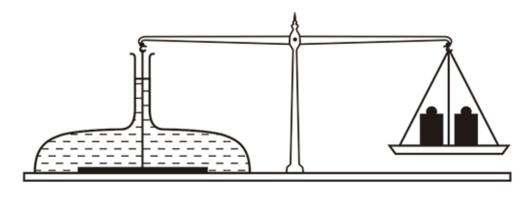


FIGURA V.5.

De esta manera la ciencia de la hidráulica se asentó en sólida base teórica y experimental, aunque sus principales progresos no se produjeron hasta el siglo XVII.

Hay bastante poco que anotar en las demás ciencias. En física el hecho más sobresaliente fue la publicación del *De magnete,* de Gilbert (p. 167), en 1600. Su título completo era *De magnete magneticisque corporibus et de magno Magnete Tellure* ("Sobre el imán y los cuerpos magnéticos, y sobre el gran imán que es la Tierra"), pero trata de más asuntos que los mencionados en el título, y aporta una base para la ciencia eléctrica describiendo varios fenómenos y experimentos de electricidad estática de los que hablaremos más adelante (p. 320), e introduce la palabra *electricidad* por vez primera (ἤλεκτρον = ámbar). Excepto en esto y algunos muy importantes adelantos en óptica, las ciencias física y química estaban casi igual que las habían dejado los árabes.

No obstante, no podemos dejar a un lado al extraño químico-médico suizo Aureolus Philippus Theophrastus Bombast von Hohenheim (1490-1541), que es más conocido por su nombre latino de Paracelso. Hijo de un médico, después de haber estudiado medicina en Basilea y en Wurzburgo, fue nombrado profesor de medicina en Basilea, en el año de 1526. Personalmente era insufriblemente presuntuoso, arrogante y vanidoso; nombrado ya profesor, su primer acto fue mostrar su desprecio a sus grandes predecesores Galeno y Avicena, quemando públicamente sus libros. Sus propias obras están mal escritas y la dificultad de entenderlas es increíble. No obstante, puede casi decirse que ha sido el primer químico verdadero en toda la historia de la ciencia.

Su interés se fijó principalmente en el empleo curativo de la química, o, como entonces se decía, en iatroquímica. Hemos visto cómo los árabes, siguiendo la dirección dada por Jabir-Ibn-Hayyam (p. 128), habían remplazado los cuatro elementos pitagóricos por tres "principios", los cuales designaban como azufre, mercurio y sal. Azufre no quería significar nuestro ele-

mento de peso atómico 32, sino la cualidad que hacía combustible a una sustancia, o, como ahora podríamos decir, ávida de oxígeno. Sal significaba la cualidad que da capacidad a una sustancia para resistir la acción del fuego, o el residuo que queda después de la calcinación, en tanto que la denominación mercurio se usaba para significar la cualidad característica de los metales. El oro, por ejemplo, se decía que contenía mercurio muy puro; el cobre no contenía azufre, sino mucha sal y mercurio, y así sucesivamente. Posteriormente, en el siglo xv, Basilio Valentin, fraile dominico, propuso añadir un cuarto principio, el arqueo, principio de fuerza y energía, el cual producía toda la actividad y todos los cambios del mundo.

Paracelso aceptó la mayor parte de todo esto, pero remplazó el arqueo de Valentin por el "espíritu vital" del primitivo pensamiento griego. Después procedió a desarrollar una quimioterapia de su creación, afirmando que cada órgano del cuerpo tiene su propia marca de espíritu vital, y que el desajuste de uno y otra produce las varias indisposiciones que afectan al cuerpo humano, de suerte que éstas podían curarse suministrando al paciente una dosis de la debida sustancia química.

Esto lo llevó a probar los efectos de varios productos químicos, venenosos y no venenosos, en los cuerpos de sus infortunados pacientes, lo que a su vez lo condujo a su expulsión de Basilea. Pero antes de que esto ocurriera, aprendió el modo de preparar gran número de productos químicos hasta entonces desconocidos, con lo que dio comienzo la química moderna, la cual empezó a desembarazarse de la alquimia que hasta entonces había usurpado su puesto.

Hemos leído, por ejemplo, que Paracelso produjo hidrógeno dejando actuar el vinagre sobre limaduras de hierro, sin sospechar en lo más mínimo que había descubierto la más fundamental de todas las sustancias químicas. Más notable aún es que parece haber preparado éter, al cual llamó *extracto de vitrio-*

lo, y descubrió sus propiedades anestésicas, sin darse cuenta de que había hecho uno de los más útiles descubrimientos de la ciencia médica. Vio que con esta sustancia podía hacer dormir unos pollitos, los cuales despertaban sin lesión alguna "después de un tiempo moderadamente largo". Pocos años después, otro médico, Valerio Cordo (1515-1544), describió nuevamente cómo preparar éter con ácido sulfúrico y alcohol, pero todavía quedó ignorado su valor práctico como anestésico.

Este periodo vio la invención de dos de los más útiles instrumentos científicos: el microscopio y el termómetro. La invención del microscopio se atribuye generalmente a Zacharias Janssen, constructor de gafas de Middelburg, en Holanda, del cual se dice que descubrió accidentalmente el principio esencial. Pero sus instrumentos eran más parecidos a pequeños telescopios que a lo que ahora llamamos *microscopio:* una lente biconvexa actuando como objetivo y una lente bicóncava como ocular. La combinación estaba montada en un tubo de unas 12 pulgadas de largo y dos de diámetro.

El termómetro fue inventado por Galileo hacia el año de 1592, según su discípulo Viviani. Quizás debiéramos decir reinventado, porque Herón de Alejandría había comprendido el principio, y lo había usado en alguno de sus juguetes mecánicos, en tanto que un cierto Filón de Bizancio, según se dice, había hecho instrumentos semejantes hacia el principio de la era cristiana. Consistía el termómetro de Galileo en un globo de cristal "aproximadamente del tamaño de un huevo de gallina", de un punto del cual salía un tubo delgado, no más grueso que una paja, pero largo de varias pulgadas y abierto en el extremo. Para usar el termómetro, el extremo abierto del tubo se introducía en el agua contenida en una vasija. Si el globo de cristal se calentaba, el aire que contenía en su interior se dilataba y parte de él salía del tubo al través del agua. Cuando se enfriaba otra vez, entraba agua en el tubo y la cantidad de ésta que había en-

trado designaba cuánto se había calentado el globo. El instrumento, naturalmente, no medía la temperatura absoluta del globo de cristal, sino únicamente la diferencia entre su temperatura normal y la que tenía cuando era calentado. A los pocos años de su invención este instrumento estaba en uso como termómetro clínico, y se empleaba diciéndole al paciente que introdujera en su boca el globo del tamaño de un huevo de gallina.

Matemáticas

Más importante en muchos aspectos que los progresos en física fueron los progresos en matemáticas. Fue aquélla una edad de útiles más que grandes matemáticos, ya que los nuevos conocimientos conseguidos eran quizás menos importantes que los nuevos métodos de adquirir conocimiento.

Prominente entre los matemáticos de aquel periodo fue Niccolo Fontana (1500-59), que fue más conocido como Tartaglia (el tartamudo). Cuando era muchacho le rompieron el cráneo, las mandíbulas y el paladar cuando entraron a saco los franceses en su ciudad natal, Brescia, y de allí provino el defecto del habla del cual vino su apodo. Después de haber llegado a ser profesor de matemáticas en Venecia, publicó un libro (*Nova scientia,* 1537), en el cual investigaba el movimiento de los cuerpos bajo la acción de la gravedad y estudió el alcance de los proyectiles, determinando que éste es máximo cuando el proyectil se dispara con una elevación de 45°, lo cual sería totalmente exacto si pudiera despreciarse la resistencia del aire. Publicó también una tratado sobre los números,[14] en el cual mostró cómo deducir de la expansión de $(1 + x)^n$ la de $(1 + x)^{n+1}$, dando de esta manera el primer paso hacia el teorema del binomio.

En 1530 afirmó que podía resolver un tipo limitado de ecuación cúbica; es decir, una ecuación que contuviera x^3, como igualmente el x^2 y x de la ecuación cuadrática que había resuelto Diofanto. Un cierto Antonio del Fiare lo desafió a un torneo matemático en el cual cada contrincante presentaría al otro problemas que contuvieran ecuaciones cúbicas y las apuestas irían al ganador, que sería el que resolviera mayor número de problemas. Cuando recibió este desafío, Tartaglia se puso a la obra y descubrió la solución general de todas las ecuaciones cúbicas, de suerte que ganó con suma facilidad.

Pero entonces apareció en escena otro matemático, Girolamo Cardano (1501-1576), hombre de brillante habilidad, pero de mente inestable. Fue médico de profesión, consiguiendo cátedras de medicina en las universidades de Milán, Padua y Bolonia sucesivamente, pero adquirió reputación europea por sus obras de astrología y de álgebra. Su obra principal, *De varietate rerum* (1557), es digna de atención porque sugiere en ella el modo de enseñar a los ciegos a leer y a escribir por el sentido del tacto, y a los sordos a conversar mediante el lenguaje de signos.

Cuando se dio a conocer el resultado del torneo entre Tartaglia y Antonio del Fiare, Cardano rogó acendradamente a Tartaglia que le mostrara cómo se resuelven las ecuaciones cúbicas, y obtuvo el secreto después de jurar que lo guardaría para sí mismo. Unos 15 años después lo publicó en su tratado de álgebra,[15] pero sin ninguna mención a Tartaglia, de suerte que hasta ahora la solución se describe como solución de Cardano. Cuando Tartaglia protestó ruidosamente, se excusó Cardano apoyándose en que únicamente había dado el resultado y no el método de resolución. A pesar de esto, Tartaglia lo retó a un duelo, cuyas armas habían de ser problemas matemáticos. Cardano no apareció a la hora señalada y la reunión terminó en desorden.[16]

La ecuación de cuártica (que contiene a x^4, y al mismo tiempo a x^3, a x^2 y a x) la resolvió por primera vez Ferrari, discípulo de Cardano, en 1540, y Cardano lo publicó en el mismo libro. Las ecuaciones de grado superior al cuarto no admiten solución exacta, como han probado varios matemáticos en el siglo XIX.

El libro de Cardano tenía un interés más serio, puesto que contenía el primer estudio conocido de las cantidades "imaginarias"; esto es, cantidades que contienen la raíz cuadrada de −1. El profano en matemáticas no siente sino un escaso interés por las cantidades imaginarias, basándose en que no pueden existir o, al menos, que no pueden comprenderse; probablemente querrá decir que no pueden representarse gráficamente como las cantidades reales, como 2 o −2. Pero representan precisamente una parte tan importante en la matemática moderna como las cantidades reales, y son de especial importancia para el físico porque intervienen en las teorías del movimiento ondulatorio, corrientes alternas en la electricidad y en la relatividad. La introducción de las cantidades imaginarias en las matemáticas fue el comienzo de un gran progreso de este punto, cuyo final aún no puede verse. Cardano muestra, entre otras cosas, que una ecuación puede tener raíces reales o raíces imaginarias, y éstas, si las hay, siempre se presentan por parejas.

Poco tiempo después, un matemático italiano, Bombelli, trató el mismo asunto con algo más de detalle, pero después de éste, el tema de las cantidades imaginarias tuvo que esperar dos siglos, hasta que se agotó en manos de Euler (p. 268), de Gauss (p. 323) y de otros. Bombelli hizo una obra todavía más útil mejorando la notación algebraica, aunque sus esfuerzos no consiguieron tanto éxito como los de Vieta, de quien hablaremos ahora.

François Viète (1540-1603), más conocido con el nombre latinizado de Vieta, era un abogado y empleado público francés que dedicó sus ocios a las matemáticas, en las cuales posteriormente adquirió considerable reputación. Ésta se apoyó, en parte, en su éxito resolviendo un problema que contenía la solución de una ecuación de grado 45 que había presentado al mundo como desafío Adrian Romanus, profesor de matemáticas en la Universidad de Lovaina. Como muchos de los problemas de “desafío”, era más aparatoso que realmente profundo. Romano conocía la fórmula ordinaria del sen($A + B$) (pág. 113), y a partir de ella era fácil calcular sen2*A*, sen3*A*, sen4*A*, etc., sucesivamente. De hecho, Rheticus había dado los valores de sen2*A* y sen3*A*; pero Romanus había calculado aparentemente los valores hasta sen45*A*, expresándolos en potencias de sen*A*, y la ecuación de su problema era simplemente sen45A = 0, disfrazada bajo la forma de una serie de potencias.

El rey de Francia Enrique IV enteró a Vieta del desafío, quien por azar de la suerte había también resuelto la fórmula general de sen*nA*, y gracias a esto pudo presentar al rey una solución al cabo de pocos minutos; éste era, naturalmente, sen4°. Tal éxito, y el hallar la clave de un despacho cifrado, dio a Vieta gran fama en Francia; pero nuestro interés por él se funda en que se le debe en gran parte nuestra actual notación algebraica y porque introdujo en el cálculo los números decimales.

Hasta la época de Bombelli algunos matemáticos habían empleado símbolos completamente distintos, como, por ejemplo, *A, B, C, D,…* para denotar cantidades que ahora representamos por x, x^2, x^3, x^4,… mientras que otros habían empleado *R,* o *Rj (radix), Z* o *C (census), C* o *K (cubus)*. Después Bombelli introdujo los símbolos $\underset{\smile}{1}$, $\underset{\smile}{2}$, $\underset{\smile}{3}$, $\underset{\smile}{4}$. Vieta entonces remplazó éstos por *A, A quadratus, A cubus, A biquadratus,* etc., y más tarde los perfeccionó presentándolos como *A, Aq, Ac, Aqq,* etc., con lo que dio al álgebra en gran parte su forma presente. Su introducción

de nuestra actual notación decimal de fracciones fue probablemente aún más útil. El matemático flamenco Simon Stevin (1548-1620) ya había introducido el uso de esta notación; pero era de difícil manejo; el número que escribimos ahora 3.1416 se escribió primero

3⓪1①4②1③6④

y más adelante como $3\ 1'4''1'''6^{IV}$. Vieta introdujo la notación 3.1416, mucho más sencilla, la cual se usa todavía en el continente, aunque los ingleses han remplazado la coma por un punto. Este último cambio, por lo que sabemos, fue introducido en 1616 por el amigo de Neper, Henry Briggs (1561-1631), que era entonces Profesor Gresham de Astronomía en Londres y posteriormente Profesor Saviliano en Oxford.

Una perfección mucho más grande fue la invención de los logaritmos por otro aficionado, John Neper (1550-1617), de Murchiston, Escocia. Rico y de buena posición social, había elegido como principal ocupación de su vida la controversia religiosa y política y las matemáticas como su ocupación favorita. El empleo que hizo Vieta de las potencias pudo muy bien atraer renovada atención a la fórmula $A^m \times A^n = A^{m+n}$, la cual era tan vieja como Arquímedes (p. 94), y desde ella no hubiera habido más que un solo paso a la concepción central de los logaritmos. Pero Neper no tuvo, al parecer ningún destello de visión interior de ese género y sólo después de muchos años de meditación y trabajo brotó en su pensamiento la idea de los logaritmos. Comparó los números y sus logaritmos con la correspondencia de los términos en las progresiones geométricas y aritméticas. Envió una exposición preliminar de su descubrimiento a Tycho Brahe en 1594, pero no lo dio a publicidad hasta 1614, cuando lo describió en un libro titulado *Mirifici logarithmorum canonis descriptio.* Éste contenía tablas laboriosamente calculadas de lo que ahora llamaríamos log senos y log tangentes. La ambición de Neper se limitaba a abreviar los cálculos

trigonométricos y no trató de aplicarlos a las operaciones de la aritmética ordinaria. La posibilidad de facilitar éstas la realizó por vez primera Briggs. De esta suerte, en tanto que concedemos a Neper la fama por el descubrimiento del principio general de los logaritmos, el crédito por haberlos hecho herramienta del trabajo diario de los matemáticos debe concederse ampliamente a Briggs. La obra conjunta de ambos fue un gran don para el mundo de la ciencia.

VI
EL SIGLO DEL GENIO
(1601-1700)

Acá y allá, en la historia de la acción y del pensamiento humanos, nos encontramos con periodos a los cuales puede propiamente aplicarse el epíteto de "grandes": en Grecia, el siglo IV a. C.; en Inglaterra la edad isabelina; en el dominio de la ciencia, el siglo XVII, el "siglo del genio", del cual trataremos ahora.

Equivaldría a falta de discernimiento el suponer que tal periodo de grandeza pudiera sobrevenir por mero accidente, aconteciendo el haber nacido en una época particular una galaxia especialmente brillante de mentalidades excepcionales. Se cree que la capacidad mental se transmite de acuerdo con las leyes de la herencia, y en este caso las leyes de probabilidad mostrarán que de una generación a la siguiente no se produce ningún salto violento. Por consiguiente, un periodo de grandeza debe atribuirse al ambiente más que a accidente alguno; si una época muestra una forma particular de grandeza, las condiciones externas deben de haberla estimulado. Por ejemplo, el siglo XVI fue una época de grandes descubrimientos geográficos, porque las condiciones de entonces los favorecían especialmente; los viajes precursores de Colón, Vasco de Gama, Cabot, Magallanes y otros habían atraído la atención hacia la riqueza de nuevos territorios que esperaban su descubrimiento, al mismo tiempo que los hombres habían aprendido a construir navíos que desafiaran las peores furias del océano.

Tal vez las causas que hicieron del siglo XVII una época de apogeo científico fueran algo análogas: el haberse dado cuenta de que vastos territorios vírgenes estaban esperando explora-

ción y desarrollo, especialmente en las ciencias físicas, en las cuales la experimentación y la observación iban sustituyendo a una fe en la autoridad en rápida decadencia, y que los instrumentos requeridos se iban consiguiendo a medida que se necesitaban; porque había llegado a ser evidente que los sentidos humanos, sin ayuda, eran inadecuados para explorar los más profundos secretos de la naturaleza. Gracias a los físicos árabes, a Roger Bacon y a otros, se conocieron bien los principios generales de óptica; al principio de este siglo ya existía el microscopio, el telescopio había de venir pronto, y otros instrumentos los seguirían en rápida sucesión. En matemáticas se acababan de descubrir los logaritmos, con los que se podía en pocas horas hacer el trabajo que antes requería toda una vida.

La Iglesia había casi abandonado su oposición, sostenida por muchos siglos, al estudio de la ciencia. Desde la época de Anaxágoras, a la religión le había sido, en el mejor caso, antipática la ciencia, y con frecuencia había sido hostil a ella; en la Edad Media había sido el freno principal del progreso. El pensamiento estaba dominado entonces por la religión en una extensión que hoy es difícil imaginar. Se consideraba el universo como una rueda de muchos radios, que partían todos del hombre y de la tierra que habitaba, y todo conducía en el espíritu de la mayor parte de los hombres a Dios y a su cielo (o infierno). Después vino el Renacimiento, que desalojó el pensamiento del hombre de su acostumbrado surco y le dio una visión más amplia, incluyendo la de un mundo en el cual incluso no había existido el cristianismo. El hombre vio que el mundo exterior era digno de estudio (para unos por razón del mundo mismo; para otros como evidencia de la bondad de su Creador). La preocupación intensa en los detalles de la religión empezaba a desvanecerse y la ciencia quedó libre de encontrar, por sus propios métodos, la senda que conduce a la verdad.

Una indicación de la nueva y más favorable posición de la ciencia fue la fundación de academias científicas, muchas de ellas nacionales en su campo de acción, que disfrutaban de protección real. En las academias de la Antigüedad los hombres ilustrados podían discutir sus problemas unos con otros y con sus discípulos. Las universidades medievales no fueron más que pobres sustitutos de aquéllas, y estaban con frecuencia bajo el dominio de la Iglesia, por lo que no podían considerar la ciencia de modo muy favorable. Cuando el siglo XVI dio paso a la rebelión general contra la autoridad, se sintió la necesidad de alguna especie de punto de reunión donde la ciencia pudiera progresar en ambiente propicio y asentarse en sus propios méritos.

Fue en Italia donde primero se tradujeron en acción tales tendencias. En 1560 se fundó en Nápoles la Accademia Secretorum Naturæ, y una sociedad semejante, la Accademia dei Lincei, existió en Roma desde 1603 hasta 1630. Aun se fundó en Florencia, en 1657, una tercera: la Accademia del Cimento, bajo el patronato del gran duque Fernando de Médici y de su hermano Leopoldo; mas sólo sobrevivió 10 años.

En Inglaterra, Francis Bacon de Verulam, en su *Novum organum* (1620), defendió la necesidad de una organización de esa naturaleza, y se cree que, en parte, por sus escritos, Carlos II fundó la Royal Society para el progreso del estudio de la naturaleza, en 1662, con el objeto de establecer un punto de reunión para los hombres de ciencia ingleses. Verdaderamente ya se habían reunido muchos de ellos de manera particular y no organizada desde 1645, primero en el Colegio de Gresham, en Londres, con el nombre de Colegio Invisible; después en Oxford durante la guerra civil y después también en Londres, de suerte que Carlos no hizo otra cosa que estampar el sello real en la aprobación de lo que ya, de hecho, se estaba realizando.

En Francia fue fundada por Luis XIV, en 1666, la Académie des Sciences. No hubo ninguna actividad correspondiente en Alemania hasta 1700, cuando el elector Federico de Prusia fundó la Academia de Berlín, aunque ya se habían hecho intentos privados de fundar una sociedad de ese género en Rostock en fecha no menos lejana que el año 1619.

Todas aquellas sociedades tenían el mismo objetivo central: el aumento del conocimiento natural por medio de la libre discusión; pero sus actividades adoptaron distintas formas en los diferentes países.

Las academias italianas estuvieron, al parecer, profundamente afectadas por conflictos entre la ciencia y la ortodoxia. La Accademia dei Lincei apoyó, según se dice, a Galileo en su rebelión contra las autoridades eclesiásticas (pp. 205 y 206). La Accademia del Cimento terminó precisamente cuando Leopoldo fue hecho cardenal de la Iglesia, y muchos han sospechado que los dos acontecimientos estaban relacionados entre sí; Leopoldo pudo haber pagado por su capelo la disolución de una sociedad que había llegado a ser una perturbación para la Iglesia. Uno de sus miembros, Antonio Oliva, cayó en las garras de la Inquisición y se suicidó para escapar a las torturas.[1]

Las academias inglesa y francesa se ocupaban en modo principal del progreso de la ciencia utilitaria, el estudio de las artes industriales y el perfeccionamiento de los métodos técnicos. La Academia Francesa explicaba esto en su divisa: *Naturæ investigandæ et perficiendis artibus,* y aunque no lo expresaba en su divisa, parece que éste fue asimismo el espíritu de la Royal Society; incluso durante sus primeras reuniones informales, Boyle escribió acerca de “nuestro nuevo colegio filosófico que no valora el conocimiento sino en lo que tiende a utilizarlo”. El patronato de la Royal Society y sus consejeros acostumbraban llamar su atención de tiempo en tiempo a las necesidades prácticas del país. Lo hallamos recomendando a su experimentador

oficial, Robert Hooke (p. 213), el estudio de las "cuestiones náuticas", al mismo tiempo que sir Joseph Williamson, secretario de Estado, lo exhortaba a ser diligente en el estudio de las cosas de uso corriente.[2] En otra parte leemos que Carlos "se reía a carcajadas del Colegio de Gresham [embrión de la Royal Society], porque pasaba el tiempo pesando el aire y no hacía otra cosa cuando se reunían en sesión".[3]

Todo esto iba de acuerdo con el espíritu de la época. La ciencia, que hasta entonces se había estudiado principalmente por interés intelectual y porque satisfacía la curiosidad de quienes la amaban por sí misma, se consideraba ya entonces como portadora de un valor utilitario. Bacon escribió mucho acerca de la "ciencia al servicio de la humanidad", al mismo tiempo que Boyle compuso un tratado sobre la *Utilidad de la filosofía natural experimental* (1663-1671), en el cual hablaba de las industrias florecientes de fabricación de gafas y de relojes como frutos de las investigaciones puramente científicas de Huygens y de Hooke. Incluso la astronomía se estaba haciendo valiosa por razón de utilidad. A principios de aquel siglo Kepler había hecho notar que la madre astronomía moriría de hambre si su necia hija la astrología no ganaba el pan para ambas. Entonces (1675) Carlos II fundó el Observatorio Real de Greenwich, "con objeto de encontrar la longitud de los lugares para la perfecta navegación y la astronomía". Indudablemente la ciencia perdió mucho por desviarse del saber por sí mismo a favor del saber por razón de utilidad; pero al mismo tiempo ganó mucho por el llamamiento que tuvo que hacer, amplio e inteligible, a la masa de pueblo en general.

Otra influencia favorable de tipo todavía más material fue el uso de la imprenta, cada vez más creciente (p. 144), la cual no sólo hizo posible que el saber llegara a todo el mundo, sino que hizo al mismo tiempo inmediatamente accesible todo nuevo conocimiento a un amplio círculo. Todo individuo se apoyaba

entonces directamente en los hombros de sus predecesores de una manera desconocida en el pasado.

Tales fueron las influencias que rodeaban la ciencia del siglo XVII y la ayudaron en su marcha. Ahora debemos describir en detalle la historia de este progreso, empezando otra vez por la astronomía, ciencia en la cual el progreso fue más espectacular.

Astronomía

Nuestra historia de la astronomía del siglo XVI acabó con el danés Tycho Brahe, que vivió solamente el corto espacio de 10 meses en el siglo XVII. Lo hemos visto nombrando, poco antes de su muerte, ayudante suyo al joven alemán Johannes Kepler, y nuestro estudio de la astronomía del siglo XVII puede muy bien, por consiguiente, comenzar con la vida fecunda de su joven ayudante.

Kepler (1571-1630). Nació el día 27 de diciembre de 1571 en Weil, próximo a Stuttgart, hijo de un pastor protestante al servicio del duque de Brunswick. Cerebro activo, pero cuerpo débil: porque un ataque de viruela cuando era niño lo dejó inválido de las manos y enfermo de la vista; esto hizo pensar que estaba indicado para la carrera eclesiástica. Por consiguiente, fue enviado a la Escuela Monástica de Maulbronn y a la Universidad Protestante de Tubinga, donde el profesor de matemáticas y de astronomía Michael Mästlin lo convenció de la certeza de las teorías de Copérnico. Kepler empezó a considerar entonces que sus opiniones eran demasiado heterodoxas para una carrera eclesiástica, por lo que obtuvo un puesto de lector de astronomía en Graz, Estiria, pero lo abandonó cuando una mayoría católica en Graz empezó a perseguir a la minoría protestante.

A la joven edad de 24 años publicó un libro: *Prodromus dissertationum cosmographicarum seu mysterium cosmographicum*

que, aunque contenía una razonada defensa de las doctrinas de Copérnico, se ocupaba más en las opiniones de su autor. Las ideas pitagóricas referentes a la importancia de los números enteros se estaban extendiendo por la Europa intelectual, y Kepler, que tenía un temperamento marcadamente místico, fue especialmente susceptible a aquellas ideas. Como los pitagóricos, estaba convencido de que Dios debió de haber creado el mundo de acuerdo con alguna pauta numérica, y como Platón, trató de descubrir las sencillas relaciones numéricas entre los radios de las órbitas planetarias. Cuando fracasó en esto, empezó a pensar que el plan del universo pudiera acaso ser geométrico antes que aritmético. Su primera idea fue que las órbitas planetarias podían estar espaciadas como los círculos de la figura VI.1. formando circunferencias inscritas y circunscritas en una serie de polígonos regulares. Cuando comprobó que esta idea no era viable, intentó remplazar las circunferencias por esferas, y los polígonos por los cinco sólidos regulares de los pitagóricos.

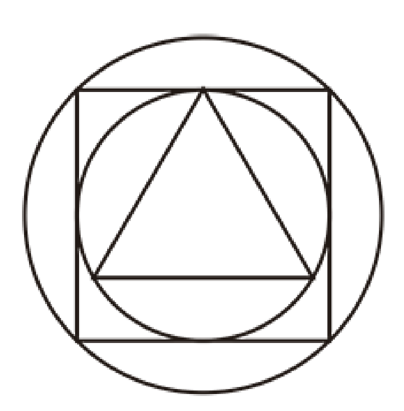


FIGURA VI.1.

Su alegría fue intensa cuando no halló ninguna discrepancia demasiado grande para ser atribuida a errores de observación; el mundo así parecía haber sido construido de acuerdo con una sencilla pauta geométrica; y declaró que no cambiaría la gloria de su descubrimiento por todo el reino de Sajonia.

No fue tan fácil despertar análogo entusiasmo en los demás. Galileo aplaudió lo ingenioso del libro; pero no pasó de ahí. Tycho ofreció el frío consejo siguiente: "En primer lugar, tratar de establecer sólidos cimientos para sus opiniones, por medio de la observación, y después, edificando sobre aquéllos, tratar de llegar a las causas de las cosas". A pesar de todo, Tycho debió de estimar la capacidad intelectual de Kepler, porque lo invitó a ir a Praga, primero como huésped y luego como ayudante suyo en el Observatorio.

Cuando Kepler aceptó este nombramiento fue inmediatamente a trabajar sobre la vasta acumulación de observaciones planetarias de Tycho. Había tenido éste la esperanza de que tales observaciones confirmarían sus propios puntos de vista anticopernicanos (p. 161), en tanto que Kepler, sin duda alguna, acariciaba otras esperanzas. Antes de que la cuestión se planteara, Tycho murió; y Kepler, que le sucedió en su puesto, quedó en libertad de inventar un plan basado en las ideas de Copérnico, el cual fue comprobado por las observaciones, y de esta manera aportar la prueba de las doctrinas de Copérnico. Pero la observación más escrupulosa que pudo hacer le arrojó una diferencia de 8″ de arco en la posición de Marte, y esto, juzgó acertadamente, era demasiado para atribuirlo a errores de observación.

Entonces dio un paso de inmensa significación y audacia. Desde los días de Aristóteles en adelante, la astronomía vivió bajo la obsesión de que la circunferencia era la curva genuina de la naturaleza y, por consiguiente, los planetas sólo podrían moverse en circunferencias o en curvas construidas con circunferencias. Hacia el año 1080, el español Arzaquel (p. 132) había pensado que los planetas podían moverse en elipses más que en circunferencias; pero su conjetura despertó poco interés. Ahora Kepler maniobraba para desenredar sus pensamientos de la limitación al movimiento circular, y se encontró con la

inmediata recompensa de un plan que satisfacía perfectamente todas las observaciones. Su libro *Astronomia nova* (1609), que anunciaba los resultados de sus trabajos, enunciaba dos leyes:

1) El planeta (Marte) se mueve describiendo una elipse, uno de cuyos focos es el Sol.

2) El radio vector que va del Sol al planeta recorre áreas iguales en tiempos iguales.

Nueve años después (1618) Kepler publicó otro libro: *Epitome astronomiæ copernicæ,* en el cual extendía aquellas leyes a los demás planetas, a la Luna y a los cuatro últimamente descubiertos satélites de Júpiter (p. 202). En su *Harmonices mundi* (1619), anunció todavía otra ley del movimiento planetario, conocida hoy comúnmente como la tercera ley de Kepler:

3) Los cuadrados de los tiempos que cada planeta invierte en recorrer su órbita son proporcionales a los cubos de sus distancias al Sol.

Estas leyes comprendían todos los aspectos del movimiento planetario. La primera especifica el camino que sigue el planeta en su movimiento, mientras que la segunda especifica cómo se mueve en su camino; esto es, de qué manera varía su velocidad. Cuando el planeta gravita más cerca del Sol, el radio vector (la línea que va del Sol al planeta) se acorta, de suerte que el planeta tiene que moverse con más velocidad para describir áreas iguales a las anteriores; cuanto más próximo al Sol está un planeta, más grande es su velocidad en su órbita. La tercera ley nos informa del tiempo que cada uno de los diferentes planetas tiene que emplear en describir su órbita. Por ejemplo, si un planeta *A* está cuatro veces más lejos del Sol que otro planeta *B,* entonces el tiempo periódico de *A* (es decir el año de *A*) será ocho veces mayor que el de *B.* Pero *A* avanza a cuatro veces la distancia de *B* en su viaje anual, de manera que su velocidad media será únicamente la mitad que la velocidad de *B.* Tomando como

ejemplo un caso real, la órbita de Saturno tiene un radio de 9.54 veces el radio de la órbita de la Tierra; la relación de los cubos de esas distancias, a saber, 868.3, tiene que ser igual a la relación de los cuadrados de los tiempos periódicos (los años) de los dos planetas. Extrayendo la raíz cuadrada de 868.3, hallamos que el año de Saturno tiene que ser igual a 29½ del nuestro. En general, cuanto más próximo al Sol está un planeta, mayor es su velocidad.

Estas tres leyes de Kepler han sido confirmadas por innumerables observaciones. Sabemos ahora que no son absolutamente exactas; pero de tal manera se aproximan a la exactitud, que no se ha encontrado ningún error en ellas por espacio de más de 200 años (p. 344). Como forman un gran hito en la historia de la astronomía, detengámonos un momento en echar una mirada retrospectiva al camino recorrido para llegar a ellas.

La parte esencial de la narración comienza con la hipótesis de Ptolomeo, la cual se expone diciendo que el Sol, la Luna y los planetas describen órbitas, en su movimiento, alrededor de la Tierra; Ptolomeo pensaba que estas órbitas eran *epiciclos* obtenidos por superposición de una órbita circular sobre otra a la manera ya explicada (p. 115). Al rodar de los siglos, y cuando fueron posibles observaciones más exactas, este esquema fue pronto inadecuado. Después Copérnico estudió el problema utilizando gran cantidad de observaciones medievales y estableció la hipótesis de que la Tierra giraba alrededor del Sol. Esto hizo posible una gran simplificación, de tal suerte que consiguió adaptarse a las nuevas observaciones utilizando sólo 34 circunferencias en vez de las 80 anteriores. Kepler vino después con las incomparablemente mejores observaciones de Tycho, y halló que no se podían adaptar al esquema de Copérnico, el cual entonces intentó corregir. Difícilmente se había atrevido Copérnico a aspirar a una exactitud con error menor de 10′ de arco; pero Kepler desechó su propio primer intento porque

presentaba un error que era únicamente $^{1}/_{75}$ de aquél. Consiguió la victoria cuando probó remplazar las excesivamente viejas circunferencias por elipses; siete elipses había entonces que tener en cuenta para el movimiento de todos los siete cuerpos celestes. El nuevo esquema era tan sencillo y convincente que las circunferencias aristotélicas caían por sí solas para bien de la astronomía. Desde los remotos tiempos griegos habían determinado los astrónomos que los planetas se movían describiendo circunferencias; Kepler demostraba ahora que no se movían de esta manera.

Pero contestando a una cuestión, Kepler había planteado otra: ¿por qué se movían los planetas en elipses y no en cualquiera de las demás curvas innumerables que pudieran imaginarse? En el pasado podía contestarse a esta pregunta diciendo que la circunferencia era la curva propia de la naturaleza; ahora la naturaleza había repudiado la circunferencia y, por tanto, se podía plantear otro tipo de pregunta. Esta cuestión dominó la astronomía hasta que apareció Newton y dio una contestación que no fue la definitiva, pero que, de modo análogo a las contestaciones de Kepler a la pregunta del cómo, pareció ser la última por unos 200 años.

El mismo Kepler se dedicó a pensar en la cuestión del "porqué", pero sin conseguir ningún éxito. Siguiendo a Pitágoras, había pensado sucesivamente que la clave de las órbitas debía hallarse en los números, los polígonos y los sólidos. Entonces recurrió a la música. Utilizando la relación pitagórica entre las longitudes de las cuerdas y las notas musicales que producían, representó los movimientos de los planetas en sus órbitas por un grupo de notas musicales (la armonía de las esferas [p. 76]) y el mismo *Harmonices mundi* que anunciaba la tercera ley de Kepler sobre los movimientos planetarios anunciaba también los acordes que los planetas deben entonar a medida que se mueven en sus trayectorias alrededor del Sol.

Pero esto no conducía a parte alguna y Kepler enseguida volvió a la mecánica. Mantenía aún el punto de vista aristotélico de que si un cuerpo estaba en movimiento algo hay que lo empuja por detrás. Por esto pensó que el Sol estaba ocupado por un *anima motrix* (fuerza motriz) que lo empujaba. Esta fuerza emitía rayos de fuerza a modo de tentáculos que giraban como aquél,[4] como los radios de una rueda, que impulsaba a los planetas. En resumen, Kepler remplazó la rotación de la "esfera de las estrellas fijas" por un Sol en rotación.

Aquello podía explicar las órbitas circulares; pero no podía explicar las órbitas elípticas; para explicar éstas se necesitaba de algo más. Había supuesto Gilbert que la Tierra atraía a la Luna como lo haría un imán, y entonces Kepler imaginaba cada planeta como un imán cuyo eje señalaba siempre la misma dirección, hallándose esta dirección en el plano en que el planeta hacía su revolución alrededor del Sol. De esta suerte, cuando un planeta describía su órbita, era atraído y repelido alternativamente por el Sol, y Kepler pensó que de esta manera se producían alternativos aumentos y disminuciones de la distancia del planeta al Sol, y de ahí las órbitas elípticas.

Kepler creía que parecidas fuerzas podían operar a través del universo y en ese punto estaba jugando con la idea de la gravitación universal, la cual describía como "afecto mutuo entre los cuerpos, tendiendo hacia la unión o conjunción, y semejante en género al magnetismo". En apoyo de esto, puso como ejemplo la tendencia de todos los cuerpos a caer hacia la Tierra: "la Tierra atrae a una piedra y no la piedra busca la Tierra"; y las marcas del océano, las cuales, igual que Gilbert y otros muchos, atribuyeron a la atracción de la Luna. Decía que dos piedras en el vacío se atraerían mutuamente y se encontrarían finalmente en el punto que ahora llamamos centro de gravedad de las dos. Si a la Tierra y la Luna no las mantuviera en sus órbitas su *anima motrix* o su equivalente, la Tierra se elevaría hacia la Luna el

espacio de la $^{1}/_{54}$ parte de la distancia que las separa, en tanto que la Luna caería sobre la Tierra recorriendo las otras 53 partes. Pero Kepler nunca sugirió, y al parecer jamás sospechó, que esta misma gravedad mantendría la Luna y los planetas en sus órbitas sin apelar a un *anima motrix* que hiciera el empuje.

La segunda ley de Kepler le había demostrado que cuanto más próximo al Sol está un planeta, mayor es su velocidad, e interpretó esto como muestra de que el *anima motrix* debe ser más grande en distancias más pequeñas. Supuso que esta fuerza debe corresponder a la inversa del cuadrado de las distancias, de suerte que a doble distancia la fuerza sería únicamente la cuarta parte de ella. Mas pronto abandonó esta opinión y decidió que la fuerza disminuía en razón inversa a la distancia, de suerte que a doble distancia sería la mitad. El astrónomo francés Bouillaud no estuvo conforme con este cambio y defendió la ley original de Kepler de la inversa del cuadrado,[5] y así quedó la cuestión hasta que Newton apareció en escena: para demostrar que la verdadera ley era la de la inversa del cuadrado, pero que no se necesitaba ninguna *anima motrix,* aparte de la atracción gravitatoria del Sol.

La primera astronomía telescópica

Entretanto, no permanecían ociosas las observaciones astronómicas. En el mismo año en que Kepler publicó su *Astronomia nova* y las dos primeras leyes del movimiento planetario, Galileo hizo su primer telescopio.

Los primeros telescopios. El verdadero origen del telescopio está sumido en alguna oscuridad. Roger Bacon había explicado vagamente los principios según los cuales podía construirse tal instrumento (pp. 139 y 140), pero no sabemos que jamás tratara de construir uno. Dícese que un matemático inglés, Leonard Digges, de Oxford, hizo uno, y que su hijo describió el modo de

usarlo; mas no parece que le siguiera ningún descubrimiento astronómico o actividad de ningún género[6] y, por consiguiente, la invención práctica del telescopio, como la del microscopio, debe atribuirse a los constructores holandeses de gafas. A principios del siglo XVII estuvieron haciendo instrumentos telescópicos del tipo gemelos de teatro, pero considerándolos únicamente como juguetes. Los registros oficiales de La Haya muestran que fue concedida una patente para la fabricación de aquellos instrumentos a un cierto Hans Lippershey de Middelburg, el 2 de octubre de 1608, y el 17 de octubre quedó anotada la aplicación análoga hecha por un tal Jacobo Metio (Metius). Descartes atribuye a Metio la invención del telescopio, pero generalmente se supone que Lippershey tiene mejor derecho a reclamar este honor. Como de la invención del microscopio por Janssen, se dice que el descubrimiento de Lippershey fue en gran parte accidental; cierto día ocurrió que manejando una combinación de lentes la enfiló hacia una distante veleta, y quedó sorprendido al verla manifiestamente agrandada.

Tan pronto como Galileo supo esto, comprendió su importancia científica y se puso a ensayar por sí mismo la construcción de un anteojo.[7] Sin "ahorrar ni trabajo ni gastos", pronto había construido "un instrumento excelente" que agrandaba los objetos alrededor de mil veces el área, reduciendo de este modo sus distancias aparentes a 30 veces menos, aproximadamente. En el año siguiente Kepler pensó en una mejor disposición de las lentes,[8] y como consecuencia el jesuita Scheiner construyó un instrumento al que incorporó aquella mejora. Pocos años después, Huygens (p. 245) hizo aún mayores perfeccionamientos que dieron al instrumento su forma actual.

GALILEO. Hasta entonces Galileo no había hecho gran cosa en astronomía; mas parece que veía con simpatía las ideas de Copérnico, y algunos dicen que fue persuadido de la verdad de

ellas por Mästlin, el mismo que había convertido a Kepler. Pero tan pronto como tuvo un telescopio en sus manos procedió a hacer descubrimiento tras descubrimiento con infatigable rapidez. Apuntándolo a la Luna vio manchas que interpretó como sombras proyectadas por superficies irregulares. "Tenemos apariencias enteramente semejantes en la Tierra a la salida del Sol, cuando los valles no están aún iluminados; pero las montañas que los rodean, en el lado que mira al Sol, llamean con el esplendor de sus rayos; y exactamente igual que las sombras en las hondonadas de la Tierra disminuyen en tamaño a medida que el Sol se eleva, de igual manera aquellas manchas de la Luna pierden su oscuridad cuando la parte iluminada se hace más y más grande." La Luna, por consiguiente, era un mundo como el nuestro, y los aristotélicos que habían afirmado que tenía que ser una esfera perfecta, estaban equivocados.

Después dirigió el telescopio a zonas bien conocidas del firmamento y vio vastas multitudes de nuevas estrellas. "Más allá de las estrellas de sexta magnitud[9] veréis por medio del telescopio legiones de otras estrellas, tan numerosas que exceden a toda creencia."[10] Por ejemplo, el Tahalí y la Espada de Orión ya no contienen únicamente nueve estrellas, sino más de 80, en tanto que las seis bien conocidas estrellas de las Pléyades se aumentan hasta 36 y aún más. El efecto incluso es más señalado en la Vía Láctea. "A cualquier parte que dirijáis el telescopio, inmediatamente una vasta multitud de estrellas se presenta a vuestra vista; muchas de ellas son bastante grandes y extremadamente brillantes, pero el número de las pequeñas va totalmente más allá de toda determinación. La Galaxia no es otra cosa que una masa de innumerables estrellas apiñadas en racimos", lo cual es precisamente lo que Anaxágoras y Demócrito habían dicho 2 000 años antes.[11] Igualmente, Bruno había tenido razón, o casi la tuvo; el número de estrellas era seguramente muy grande, y bien podía ser infinito. Después Galileo dirigió

el telescopio a Júpiter y vio cuatro satélites girando alrededor del gran planeta, exactamente igual que Copérnico había imaginado a los planetas girando alrededor de la todavía mayor masa del Sol. Por lo tanto, probablemente tenía razón Copérnico, puesto que allí había una reproducción en miniatura del sistema solar tal como él lo había imaginado. Un estudio hecho sobre Venus demostró que pasaba por una sucesión de "fases" análogas a las de la Luna: Luna nueva, cuarto creciente, Luna llena, cuarto menguante, otra vez Luna nueva, y así indefinidamente. Esto probaba que Venus no tenía luz propia, sino que brillaba por la luz reflejada del Sol. Pero esto demostraba aún más. Porque la hipótesis de Ptolomeo requería que Venus no mostrara nunca a la Tierra más que un semicírculo iluminado de su superficie, en tanto que la hipótesis de Copérnico exigía exactamente la sucesión de fases que se veían efectivamente. De esta suerte, esta sola observación de Galileo canceló la hipótesis de Ptolomeo y estableció la de Copérnico para todos los que pudieran convencerse mediante prueba de vista. El 30 de enero de 1610 Galileo escribió lo siguiente: "Estoy completamente maravillado y doy infinitas gracias a Dios, que me ha permitido descubrir tan grandes maravillas".

Más tarde, en el mismo año, observó los anillos de Saturno, pero los interpretó erróneamente, y en sus escritos dice que Saturno está formado por "tres esferas que casi se tocan mutuamente". Hizo asimismo observaciones sobre las manchas del Sol. Kepler había observado en el Sol, sin ayuda de telescopio, en 1607, una mancha oscura; pero había pensado que era Mercurio pasando a través del disco del Sol. También Johan Christian (Fabricius) había observado manchas en el Sol, parece que anteriormente a Galileo, y el jesuita Scheiner observó algo parecido en abril de 1611. Al principio pensó que sería una ilusión óptica, pero más tarde, cuando quedó convencido de su realidad, vio que daban la prueba de que el Sol gira alrededor

de su eje y aportó los medios de determinar el periodo de esta revolución.

El año de 1613 publicó Galileo sus *Cartas sobre las manchas solares,* en las cuales no ocultó nada acerca de sus opiniones sobre Copérnico y, en consecuencia, se vio acusado de herejía. Trató de defenderse mediante citas de las Escrituras, pero las autoridades eclesiásticas le advirtieron que debía abstenerse de argumentos teológicos y limitarse a sus razonamientos sobre física. A principios de 1616 se le hizo comparecer ante la Inquisición, que le emplazó para una reunión de sus teólogos consultores para el 19 de febrero, con objeto de que opinara acerca de las dos proposiciones siguientes:

1) El Sol es el centro del universo y está enteramente inmóvil.

2) La Tierra no es el centro del universo ni está inmóvil, sino que se mueve con movimiento diario.

Los reunidos opinaron unánimemente que la primera proposición es "falsa y absurda, desde el punto de vista filosófico y formalmente herética", y juzgaron que la segunda proposición "merece la misma censura desde el punto de vista filosófico; y en cuanto se refiere a la verdad teológica, es por lo menos errónea respecto de la fe". El 25 de febrero el papa envió al cardenal Bellarmine, miembro directivo de la Inquisición, para emplazar a Galileo con admonición de que abandonara la creencia que esta asamblea había condenado. Si Galileo se negaba a hacerlo, llevaba mandamiento formal de ordenarle, bajo pena de prisión, "de abstenerse a enseñar o defender este género de doctrina y creencia, ni tratar de ello". Galileo fue debidamente emplazado y vio a Bellarmine al siguiente día (con resultados que no conocemos con precisión). Mas una semana después fue publicado un decreto por el que se ordenaba que la obra de Copérnico se retirara de la circulación hasta que se corrigiera. Se publi-

có el libro cuatro años después con "correcciones" con base en las que había hecho anteriormente Osiander, opinando que el movimiento de la Tierra no era una verdad absoluta, sino únicamente una hipótesis que facilitaba los cálculos.

Después de un periodo de aquiescencia, Galileo publicó *Il saggiatore* (*El ensayista*) en 1623, dedicándolo al nuevo papa Urbano VIII, que había simpatizado tanto con la astronomía, que escribió un poema celebrando el descubrimiento que había hecho Galileo de los satélites de Júpiter. Aparentemente quería pasar por alto las varias tendencias heterodoxas de este libro y la grieta existente entre la religión y la ciencia; por lo menos, tal como estaba representada por el papa y Galileo, y podía haber sido tapada sólo con que Galileo dejara dormir a los sabuesos. Pero no estaba en su temperamento hacerlo así, y en enero de 1632 publicó un *Diálogo sobre los dos principales sistemas del mundo, el de Ptolomeo y el de Copérnico.* Entonces estalló la tormenta.

En este libro hay tres personajes que se ponen a discutir los méritos de los dos sistemas. Uno de ellos es, naturalmente, un partidario convencido de Copérnico, el otro es un violento adversario de éste, apoyado en las doctrinas de Aristóteles, mientras que un tercero proclama ser un observador y comentarista imparcial. El comentario imparcial no era, en ningún caso, el modo de Galileo, y mucho menos en aquello donde difícilmente podía comprender que fuera en ningún caso materia de discusión, sino comentarios basados en Copérnico. De esta suerte hizo al adversario de Copérnico desesperadamente estúpido e incapaz de comprender el más sencillo de los argumentos.

La composición de este libro era, naturalmente, un público desafío a la admonición del papa de 25 de febrero de 1616 para que abandonara las opiniones en favor de Copérnico, y más aún incluso a la formal prohición del 26 de febrero, si es que le fue transmitida.[12] No obstante, Galileo había conseguido obte-

ner permiso, para la publicación del *Diálogo,* del Censor del Santo Oficio, bajo dos condiciones. La primera era la vieja condición de que el movimiento de la Tierra estaba tratado como hipótesis y no como hecho; la segunda era que el libro debería contener ciertos argumentos, que habían sido dados por el papa, en favor de la opinión ortodoxa. Galileo no sólo no cumplió con la primera condición, sino que al mismo tiempo, de manera enteramente gratuita, dejó abierto el camino para mayores contratiempos por la manera como cumplió con la segunda. Porque puso los argumentos del papa en boca del muy estúpido tipo de adversario de Copérnico.

El que observó las manchas del Sol, el jesuita Scheiner, con quien Galileo estaba ya en malas relaciones debido a una discusión en cuanto a la prioridad en el descubrimiento de las manchas del Sol, aprovechó esta oportunidad de hacerle daño, y aseguró que el bobo del libro era un retrato por escrito de Su Santidad. En agosto de 1632 se prohibió la venta del libro de Galileo y se designó una comisión para que diera un informe sobre aquél. Informaron desfavorablemente y Galileo fue citado a comparecer ante la Inquisición.

Llegó en febrero de 1633 e inmediatamente se le puso en prisión, aunque parece que se le trató con gran consideración y con toda cortesía. Dos meses más tarde tuvo lugar la vista de su proceso y dícese que se le amenazó con el tormento, aunque también se dice que no había intención ninguna de ejecutar tal amenaza. En junio se pronunció la sentencia: Galileo tenía que hacer penitencia durante tres años y retractarse en hábito de penitente de todas las doctrinas de Copérnico. Al retractarse tenía que afirmar, no sólo sus creencias en aquel momento, sino al mismo tiempo predecir que las mantendría en el resto de su vida: "Yo [...] doy seguridad de que creo y siempre creeré lo que la Iglesia reconoce y enseña como verdad". No hay razón alguna para aceptar el cuento enteramente improbable de que

Galileo terminó aquella retractación murmurando en voz baja las palabras *E pur si muove* (“Y, sin embargo, se mueve”). Es, desde luego, lo que Galileo hubiera podido decir; pero la ocasión no era la más propicia para decirlas.[13]

Después de otra temporada de prisión, se le permitió trasladarse a Arcetri, fuera de Florencia, donde continuó trabajando en problemas científicos, que ya no fueron de los que producían discusiones. En 1637 descubrió allí el movimiento de “libración” de la Luna: las pequeñas oscilaciones de la Luna que se manifiestan al presentar pequeñas y distintas porciones de su superficie, vistas desde la Tierra, en sucesivos meses lunares.

Se dedicó también a hallar el modo de que un navío determine su posición en alta mar. Este problema no se había presentado a la navegación antigua o medieval, porque había consistido en poco más que navegación de cabotaje; pero con el descubrimiento del Nuevo Mundo se reclamaban otros métodos. Un navío puede sin dificultad determinar su latitud anotando la máxima elevación del Sol; pero la determinación de la longitud plantea un problema mucho más difícil. En 1598 Felipe III de España ofreció un premio de 100 000 coronas para quien hallara el procedimiento de fijar la posición de un navío cuando se hallara fuera de la vista de la tierra, y los holandeses le siguieron muy pronto con una oferta análoga.

Hay una solución que es en principio bastante sencilla. Cuando decimos que la posición de un navío es la de 60° al oeste de Greenwich, queremos significar que allí es mediodía cuatro horas más tarde que en Greenwich.[14] Entonces, si se dispusiera en el navío de un reloj que llevara la hora de Greenwich, la longitud del punto en que se encontrara se hallaría inmediatamente viendo la hora que este reloj marcara en el momento del mediodía local; esto es: cuando estuviera el Sol en su altura máxima. Los navíos modernos deben llevar cronómetros que señalen la hora de Greenwich durante el viaje y pueden, ade-

más, recibir la hora de Greenwich por radio; pero ninguno de estos métodos estaba a disposición de los navegantes del siglo XVII, los cuales, con frecuencia, estaban alejados de 200 a 300 millas de la posición que señalaba su estima, y por lo cual también con frecuencia perdían sus navíos.[15]

Galileo indicó que se podían preparar de antemano horarios de movimiento y de los eclipses de los satélites de Júpiter y que un navegante provisto de tales tablas tendría en el sistema de Júpiter el reloj necesario por medio del cual podía leerse la hora base y determinarse la longitud del punto en que se encontrara un navío. Este método se usó raramente, porque muy pronto se encontró que el movimiento de la Luna en el firmamento proporcionaba un reloj todavía mejor; el hombre de mar puede decir la hora base en cualquier momento tomando nota de la posición de la Luna respecto de las estrellas más próximas: en principio esto es tan sencillo como mirar las manecillas de un reloj.

Galileo quedó ciego en 1637 (algunos creen que a causa de observar el Sol sin protección adecuada para la vista) y la obra de su vida llegó a término. Falleció en 1642, año del nacimiento de Newton, quien había de difundir y dar más amplia significación a sus trabajos.

Exactamente igual que la obra primitiva de Galileo en mecánica había hecho añicos la física aristotélica, su obra posterior en astronomía hizo pedazos la cosmología aristotélica. A principios del año 1610 había observado las fases de Venus, el movimiento orbital de los satélites de Júpiter, y las innumerables estrellas de la Vía Láctea, al mismo tiempo que Kepler había enunciado sus dos primeras leyes del movimiento planetario. El esquema principal del universo quedó entonces claramente determinado, y era evidente que la victoria final quedaría únicamente en favor de Copérnico, Bruno y Galileo.

Descartes (1596-1650). El inmediato paso importante (importante aunque retrógrado) lo dio René Descartes, el filósofo, a quien ya hemos situado como uno de los fundadores de la geometría analítica. Nació cerca de Tours, en el seno de una familia pudiente; fue educado en la escuela de jesuitas de La Flèche, donde se mostró excepcionalmente brillante en matemáticas, y más tarde estudió igualmente matemáticas durante dos años con Mersenne, el famoso matemático parisino. Después de pasar breve periodo de tiempo en el ejército del príncipe Mauricio de Orange, rescindió su compromiso a la edad de 25 años para dedicar el resto de su vida a las matemáticas y a la filosofía.[16]

Pasado cierto tiempo en viajes, se estableció en Holanda y durante cinco años trabajó componiendo un libro titulado *El mundo,* que aspiraba a dar una completa perspectiva de la ciencia al mismo tiempo que una teoría completa del universo físico. Cuando le faltaba poco para acabar el libro, en 1633, tuvo noticia de la condena de Galileo. Entonces explicó[17] que si bien no había notado nada en las doctrinas que le pareciera perjudicial ni a la religión ni al Estado, empezaba entonces a sentirse intensamente preocupado por algunas de sus propias doctrinas y, en consecuencia, decidió no publicar su libro. De hecho lo publicaron otros, en el estado en que quedó, es decir, sin terminar, el año de 1664 (14 años después de su muerte). Pero había hecho breve resumen de sus conclusiones en su *Discurso del método* (1637), y una más extensa exposición de sus ideas en sus *Principia philosophiæ* (1644).

Estas conclusiones carecían de valor, pero la teoría de Descartes tiene gran interés, porque es el primer intento de explicar el universo sobre líneas puramente mecánicas. Es la teoría de un filósofo más que la de un hombre de ciencia ya que esta-

ba basada en principios generales, contemplación y conjeturas más que en la experimentación. Por ejemplo, condena los experimentos de Galileo con el comentario de que “todo lo que dice Galileo sobre la filosofía de los cuerpos que caen en el vacío está edificado sin cimientos; debe primeramente determinar la naturaleza del peso”.

Siguió a Galileo al dividir las cualidades de las sustancias en dos grupos, a las que llamó primarias y secundarias. Las cualidades secundarias son la dureza o la blandura, la dulzura o la acidez, y así sucesivamente, las cuales necesitan de los sentidos para ser percibidas (o así lo pensó Descartes), en tanto que son cualidades primarias las que existen con derecho propio, sean o no percibidas. Dice Descartes que hay solamente dos cualidades primarias: la extensión en el espacio y el movimiento, de suerte que no hay nada que tenga verdadera significación objetiva, excepto éstas: “Dadme extensión y movimiento y construiré el mundo”.

Continúa arguyendo que, así como la extensión es propiedad fundamental de la materia, la extensión sin materia es inconcebible (extraño argumento para un filósofo que declaraba no aceptar nada que no pudiera determinarse con certeza).[18] En consecuencia, todo espacio tiene que estar ocupado por materia de uno u otro género; “el vacío o espacio en que no hay absolutamente ningún cuerpo repugna a la razón”. De acuerdo con esto, imagina que todas las porciones del espacio que no están ocupadas, por lo que nuestra experiencia las considera materia sólida, están ocupadas por otra materia “primaria”, compuesta de finísimas partículas que no producen impresión alguna en nuestros sentidos.

Cuando un pez nada a través del agua del mar impulsa a uno y otro lado partículas de agua de su frente, en tanto que otras partículas detrás de aquél llenan el espacio que dejaría vacío, de suerte que el agua se mueve constantemente alrededor en apre-

tados círculos. “Todos los movimientos naturales son en cierta manera circulares.” De análoga manera pensó Descartes que, cuando la grosera materia ordinaria se abre camino a través del mar de partículas, éste se mueve en apretados círculos y de esta suerte se le puede representar como una serie de torbellinos.

Sobre estos cimientos construyó Descartes su famosa teoría de los torbellinos. Éstos son remolinos en un océano de partículas; los objetos materiales ordinarios eran como corchos flotantes que revelaban cómo marchaban las corrientes dentro de los remolinos. Las más finas partículas de todas, que eran raspaduras o limaduras de los más ordinarios géneros, eran arrastradas y tragadas por los centros de los torbellinos. Los planetas eran corchos arrebatados por el torbellino del Sol y giraban alrededor de su centro, mientras la hoja que cae era un más pequeño corcho arrastrado en dirección al centro del torbellino de la Tierra. En especulación posterior se suponía que hay tanta agitación en el centro de un gran torbellino que los objetos se hacen luminosos; esto explicaba por qué brillan el Sol y las estrellas.

Este sistema alcanzó una boga totalmente desproporcionada a sus méritos científicos, en parte, sin duda alguna, porque era fácil de visualizar y de esta manera parecía fácil de comprender. Pero no hubo en él intento alguno de explicar las leyes cuantitativas, como, por ejemplo, las leyes de Kepler acerca del movimiento, y no sobrevivió al ser puesto a prueba por otros, como demostró Newton de manera conc1uyente.[19] Sin embargo, la teoría de Descartes invadió el campo, y fue verdaderamente lo mejor que pudo ofrecer la ciencia, hasta que la remplazó la incomparablemente superior de la gravitación universal, de la cual vamos a tratar inmediatamente.

Gravitación universal

Hemos visto (p. 198) cómo Kepler jugó con la idea de la gravitación universal; pero no tuvo ni la menor sospecha de que las fuerzas gravitatorias bastasen para explicar los movimientos de los planetas; en realidad, pensaba que éstos no podían mantener sus movimientos orbitales a menos que alguna fuerza los empujara continuamente. Ciertamente, por supuesto, el movimiento de un planeta es mantenido por su propia cantidad de movimiento, o *momentum*. Lo que se necesitaba para explicar los hechos observados no era una fuerza de propulsión que mantuviera el planeta en movimiento continuo, sino una fuerza de atracción que cambiara continuamente la dirección del movimiento del planeta, y evitara de este modo que se alejara del Sol en línea recta.

El principio general que esto implica lo estableció muy claramente Plutarco 1 400 años antes de que naciera Kepler, aunque referido especialmente al movimiento de la Luna alrededor de la Tierra. Había dejado escrito: "La Luna está asegurada contra la caída [sobre la Tierra] por su movimiento y por las oscilaciones de su movimiento de revolución [exactamente igual que los objetos puestos en una honda se encuentran impedidos de caer por el giro circular]",[20] y era necesario descubrir sólo qué cosa es lo que desempeñaba el papel de la honda.

En el año de 1666 nada menos que tres personas se enfrentaron al problema casi simultáneamente; en orden alfabético fueron Borelli, Hooke y Newton.

Borelli. Era Borelli profesor de matemáticas en la antigua Universidad de Pisa de Galileo, y publicó un libro[21] en el que decía que un planeta moviéndose en órbita circular alrededor del Sol tenía tendencia a alejarse de este astro, e igualmente que Plutarco en el pasado, comparó el movimiento de aquél con el de una piedra en una honda. Argumentaba diciendo que puesto que un planeta, como hecho real, no se aparta del Sol, debe de

haber alguna fuerza que lo atrae hacia él; cuando la tendencia de atracción de esta fuerza es exactamente igual a la tendencia a escapar causada por el movimiento, entonces queda establecido el equilibrio, y el planeta gira constantemente alrededor del Sol a una distancia definida. Era aquélla la vez primera que se había planteado sobre base segura, desde los tiempos de Plutarco, la mecánica de tal problema.

HOOKE (1635-1703). Lo mismo estaba diciendo en Inglaterra, casi al mismo tiempo, Robert Hooke, que era a la par sagaz pensador y experimentador ingenioso. Después de haber desempeñado el puesto de ayudante experimentador desde 1655 hasta 1662, por nombramiento de Robert Boyle, de quien trataremos más adelante (p. 249), fue contratado como Guardián de la recientemente fundada Royal Society, siendo su deber realizar los experimentos sugeridos, bien fuera por su propio fértil cerebro o por los otros colegas. En un documento fechado en 23 de mayo de 1666 estudiaba de qué manera la trayectoria de un cuerpo celeste podía curvarse en circunferencia o en elipse, y consideró que esto podía deberse a "una fuerza de atracción del cuerpo situado en el centro [de la órbita] por medio de la cual estaría continuamente atrayéndolo [al cuerpo celeste] o tirando de él". Decía Hooke que si se aceptara tal fuerza, entonces "todos los fenómenos que presentan los planetas posiblemente, al parecer, podrían explicarse por los principios comunes del movimiento mecánico".

En otro documento publicado ocho años después intentó "explicar un sistema del mundo que difería en muchos aspectos particulares de cualquiera de los conocidos, pero respondiendo en todo a las reglas comunes de los movimientos mecánicos. Éste se apoya en tres hipótesis". La primera hipótesis es simplemente la gravitación universal.

> La segunda es que todos los cuerpos, cualesquiera que fueren, continúan moviéndose avanzando en línea recta hasta que son desviados por algunas fuerzas

activas, y lanzados en círculo, elipse o cualquier otra curva más complicada. La tercera hipótesis es que estas fuerzas son más fuertes a distancias cortas, y disminuyen su intensidad a medida que aumenta la distancia.

En lo anterior Hooke enuncia con seguridad los principios mecánicos que gobiernan los movimientos de los planetas, y sugiere una fuerza de gravitación universal. No dice cómo ha de variar la fuerza con la distancia, si de ello ha de resultar que los planetas se mueven en las elipses que se observan en realidad. Cinco años después (1679) escribió a Newton que si la fuerza variaba con la inversa del cuadrado de la distancia, entonces la órbita de un objeto proyectado desde la superficie de la Tierra sería una elipse teniendo uno de los focos en el centro de la Tierra.[22] La teoría de los movimientos planetarios y de la gravitación universal estaba ya casi completa, pero necesitó del genio de Newton para fundirla en un conjunto consistente y determinar que la fuerza misteriosa que mantenía los planetas en movimiento en sus órbitas alrededor del Sol era idéntica a la fuerza familiar que hacía que una manzana cayera al suelo.

Newton (1642-1727). Isaac Newton nació prematuramente en el día de Navidad de 1642, en la hacienda de Woolsthorpe, cerca de Grantham, en el condado de Lincoln, siendo el hijo póstumo de un hacendado que fue señor de la hacienda de Woolsthorpe. Era tan pequeño al nacer que su madre dijo que podría meterlo en una olla de un cuarto de galón,[23] y tan falto de vitalidad que las dos mujeres que fueron a buscar un "medicamento tonificante" para la pobre criatura se sorprendieron de hallarlo todavía vivo cuando regresaron.

A su debido tiempo fue enviado a la escuela de Grantham. No resultó ser un buen alumno, falto de atención y, según su propia afirmación, atrasado en su clase. Pero demostró cierta aptitud mecánica en sus juegos, inventando maneras ingeniosas de medir la velocidad del viento, haciendo relojes, relojes de sol

y un modelo eficaz de molino de viento, y diseñando un coche que marchaba cuando su ocupante daba vueltas a un manubrio.

Cuando tenía 13 años de edad, su madre perdió a su segundo marido, y Newton fue llamado a casa para ayudar en la hacienda. Mas pronto se vio claramente que su interés estaba en otra parte y que pensaba más en los problemas mecánicos que en la agricultura. Finalmente, quedó decidido que jamás sería un buen labrador y de esta manera podría intentar dedicarse al estudio. Se le envió al Colegio de la Trinidad (Trinity College) en Cambridge, colegio en el cual había sido educado su tío, en el que ingresó probablemente en junio de 1661.

No hay prueba alguna de que en aquel tiempo se interesara especialmente por las ciencias o que produjera especial impresión por sus disposiciones a las autoridades del Colegio. Un libro sobre astrología parece haber sido más eficaz que ellos para despertar su interés por la ciencia, porque en este libro encontró un diagrama geométrico que no pudo entender, y entonces compró un *Euclides* y se puso a la obra de aprender geometría. Habiendo dominado con facilidad este libro, se puso a estudiar la mucho más difícil *Geometría* de Descartes, la cual parece que le despertó real interés por las matemáticas y gusto por la ciencia.

En el estío de 1665 y en el siguiente de 1666 Inglaterra fue devastada por la peste, y los estudiantes de Cambridge fueron enviados a sus casas para librarlos del contagio. En la paz de Woolsthorpe encontró Newton tiempo libre para reflexionar sobre muchos de los problemas científicos de aquel tiempo, y consiguió excelentes progresos en la búsqueda de las soluciones de varios de ellos. Escribiendo sobre este tema alrededor de 50 años después,[24] dice:

> A principios del año 1665 encontré el procedimiento para aproximar las series, y la regla para transformar cualquier dignidad [cualquier potencia][25] de cualquier binomio en una serie.[26] En el mismo año, en el mes de mayo hallé el método de tangentes de Gregory y Slusius, y en noviembre hallé el método di-

recto de las fluxiones,[27] y en el año siguiente, en el mes de enero, hallé la teoría de los colores, y en mayo siguiente tuve acceso al método de fluxiones inversas [o sea el cálculo integral]; también en aquel mismo año [1666] comencé a pensar en la gravedad extendiéndola al orbe lunar, y [...] de la Regla de Kepler sobre los tiempos periódicos de los planetas, deduje que las fuerzas que mantienen a los planetas en sus órbitas deben estar en relación recíproca a los cuadrados de sus distancias a los centros a cuyo alrededor hacen su movimiento de revolución; y por esta causa comparé la fuerza requerida para mantener la Luna en su órbita con la fuerza de gravedad en la superficie de la Tierra y hallé la contestación casi en seguida. Todo esto ocurrió en los dos años de la peste, 1665 y 1666, porque en aquel tiempo estaba yo en la flor de la edad para inventar, y pensaba en matemáticas y filosofía más que en ningún otro tiempo desde aquél.

Por consiguiente antes de llegar a los 24 años de edad ya había pensado en un programa que ocuparía gran parte de la obra de su vida.

Cuando regresó a Cambridge fue elegido *fellow* (socio) de su colegio en 1667. Dos años después, el entonces profesor lucasiano de matemáticas de la Universidad, Isaac Barrow (1630-1677), que era más que mediano matemático, renunció a su cátedra con el expreso propósito de dejar libre una vacante para Newton. Cuando Newton fue formalmente elegido, quedó en libertad de dedicar todo el tiempo a la ciencia.

Trabajó apaciblemente en Cambridge hasta 1689, año en el cual fue elegido miembro del Parlamento, en representación de la universidad. Pero aquel particular Parlamento sólo duró 13 meses, de suerte que en el año siguiente regresó a Cambridge. En 1696 se trasladó de modo permanente a Londres, donde fue nombrado alcaide de la Casa de la Moneda. Tres años después fue promovido a la dirección.

Todas las versiones coinciden en que Newton fue sumamente competente como director de la Casa de la Moneda y que se debió en muy gran parte a sus esfuerzos que la moneda inglesa se asentara en base satisfactoria en un tiempo difícil. Observó que había una relación entre los precios y la cantidad de moneda en circulación, que fue la que tomó forma posteriormente en la llamada *teoría de la cantidad* de moneda: si la suma de la

moneda en circulación se duplica, permaneciendo igual lo demás, entonces los precios (en términos de la moneda legal) se duplicarán aproximadamente. Se trata de una simple aplicación en el campo de la economía del bien conocido principio de que es imposible proporcionarse algo a cambio de nada; pero al parecer hizo falta que Newton le diera carta de naturaleza. Esto se puede comparar al consejo que dio Copérnico al gobierno polaco sobre cuestiones de moneda legal (p. 149), y haciéndolo así descubrió otra importante ley sobre la circulación de moneda que ordinariamente se conoce como la *ley de Gresham,* que dice así: "Cuando la mala moneda se reconoce como pago legal, la moneda buena se retira de la circulación". Al parecer, Copérnico se anticipó claramente a Gresham en la circulación de esta ley, pero es igualmente claro que Oresme (p. 142) se anticipó a Copérnico. Es extraño que tantos astrónomos en el mundo se hayan visto tan íntimamente mezclados con los problemas del inmundo lucro.

La aceptación del cargo en la Casa de la Moneda acabó virtualmente la obra original de Newton en la ciencia; pero fue elegido presidente de la Royal Society en 1703, y en todos los años sucesivos hasta su muerte. Falleció el 20 de marzo de 1727, después de dos o tres años de falta de salud.

La transcripción hecha en la p. 216 demuestra que en el año 1666 Newton había pensado ya las líneas principales de su famosa teoría de la gravitación. Otros habían también pensado, como hemos visto anteriormente, o estaban pensando por entonces, según la misma línea de pensamiento; pero Newton hizo lo que no habían hecho los otros: aplicó una prueba numérica, y halló que el resultado era exacto, o "pasaderamente exacto".

El principio en que se funda esta prueba es muy sencillo. Si la fuerza de atracción del Sol faltara repentinamente cuando un planeta está en *P* (fig. VI.2.), el planeta ya no seguiría describien-

do la circunferencia en la dirección *PR,* sino que empezaría a marchar en línea recta *PQ,* y en un segundo llegaría al punto *Q* de esta línea. En realidad, es la fuerza de atracción del Sol la que le hace continuar al planeta en la órbita circular y llegar en un segundo al punto *R,* recorriendo en su tendencia a caer hacia el Sol la distancia *QR.* Supongamos entonces que la órbita de este planeta es cuatro veces mayor que la órbita de la Tierra. La tercera ley de Kepler (p. 196) nos dice que tal planeta tardará un tiempo ocho veces mayor que el que tarda la Tierra en describir su órbita, de suerte que la distancia *QP* que recorre en un segundo sería la mitad de la que recorrería la Tierra en ese mismo tiempo. Pero *QT,* que aproximadamente es el diámetro de la órbita, es cuatro veces mayor que el de la órbita de la Tierra, de manera que *QR,* que sabemos que es igual a QP^2/QT, será la decimasexta parte de la Tierra. Por consiguiente la atracción que ejerce el Sol sobre un planeta situado a una distancia cuádruple de la Tierra será sólo la decimasexta parte del que ejercería sobre él a la distancia de la Tierra. De igual manera se demostraría que la atracción a una distancia *n* veces de la Tierra será $1/n^2$ veces la atracción a la distancia de la Tierra. He aquí la famosa ley de la razón inversa del cuadrado de las distancias.

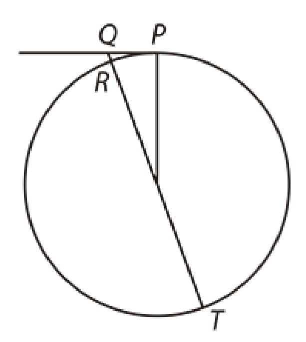


FIGURA VI.2.

Newton pudo haber enunciado esta ley y aplicarla a todos los planetas, de conformidad con la ley de Kepler (como ocurre

en realidad). Pero no lo hizo así porque quería llegar más lejos y demostrar que la gravitación que mantenía a los planetas en sus órbitas era idéntica a la conocida *gravedad,* que obliga a una piedra o una manzana a caer al suelo. Su sobrina Catharine Barton dijo a Voltaire y a Martin Folkes, presidente de la Royal Society, que fue la caída de una manzana en el huerto de Woolsthorpe lo que desencadenó en Newton esta serie de ideas, e igualmente Stukeley, amigo de Newton, anota que a él mismo le dijo Newton que la caída de una manzana fue lo primero que le sugirió la idea de la gravitación.[28]

Newton sabía que la gravitación de la Tierra hace que los objetos caigan en dirección al centro de la Tierra a la velocidad de 16 pies (4.86 metros) en un segundo. Si era verdad lo que Newton suponía, la Luna, distante del centro de la Tierra 60 veces el radio de ésta, caería con una velocidad por segundo igual a 1/3 600 de 16 pies. Newton calculó entonces desde qué altura estaba cayendo la Luna, y halló que el resultado coincidía "casi exactamente" con lo que exigía su teoría. Pero parece que no le satisfizo esta aproximación y supuso que la Luna tal vez se mantuviera en su órbita por combinación de la gravedad y de los torbellinos de Descartes. Entonces dejó a un lado sus cálculos y no se ocupó de ellos durante 20 años.

Pudiéramos preguntarnos muy bien por qué los cálculos de Newton no conseguían más que una "aceptable aproximación". Dice su amigo Pemberton que "estando apartado de sus libros" en Woolsthorpe, empleó un valor equivocado del radio de la Tierra, lo cual, naturalmente, tenía que dar valor erróneo para el radio de la órbita 60 veces mayor. Puede ser, supone Pemberton, que confundiera las millas inglesas con las millas marinas; o que tomara un valor erróneo de un libro que se sabe poseía, en el cual se asignaba al grado nada más que 66 millas. Queda todavía otra suposición: que no estuviera seguro de que la atracción gravitacional de la Tierra actuara sobre un objeto

tan próximo como una manzana que cae de un árbol. En 1685 comprobó que sería lo mismo si toda la sustancia de la Tierra se concentrara en su centro; sabiendo esto, y empleando ya un valor correcto para el radio de la Tierra, encontró que sus cálculos estaban perfectamente de acuerdo con la observación. Pero en el año de 1666 no podía conseguir tal coincidencia y se contentó simplemente con no ocuparse del asunto. Acaso su fértil inteligencia estuviera en aquel entonces más interesada por algún otro problema.

Casi a fines de 1679 escribió a Hooke diciéndole, entre otras cosas, que había estado tratando durante algunos años de "pasar de la filosofía a otros estudios", porque le disgustaba que le ocupara tanto tiempo, "excepto, acaso, en horas de ocio y algunas veces como distracción". No sabemos qué es lo que entonces reclamaba su atención. Puede acaso que fuera la teología, a la cual tomó cada vez mayor afición a medida que pasaron los años.[29] O acaso la química, a la cual concedió una cantidad de tiempo fuera de toda proporción comparado con los resultados que consiguiera en este campo.[30]

En la carta citada hacía observar que si la Tierra giraba en movimiento de rotación, un objeto que cayera se apartaría algo hacia el Este en el curso de su caída e imaginó que se podría obtener una prueba de la rotación de la Tierra dejando caer un cuerpo desde cierta altura y observando dónde tocaba al suelo. A principios de 1680 replicó Hooke que él había hecho el experimento indicado y conseguido el resultado que se esperaba y entonces fue a preguntar a Newton cuál sería la trayectoria exacta seguida por un objeto que cae atraído por la Tierra con una fuerza que variaba en razón inversa al cuadrado de la distancia. Dice Newton, en una carta dirigida a Halley en 1686, que él buscaba la solución del problema para satisfacer su propia curiosidad y halló que la trayectoria por recorrer debía ser una elipse que tuviera su centro de atracción en uno de sus fo-

cos: exactamente la trayectoria que seguían los planetas en su movimiento alrededor del Sol y que había hallado Kepler. Luego "abandonó los cálculos referentes a esta cuestión para dedicarse a otros estudios", y dejó sin contestación la carta de Hooke.

Cuatro años después (enero de 1684), Hooke, Halley el astrónomo (p. 229), y sir Christopher Wren, astrónomo y arquitecto, se encontraron en Londres. Todos ellos llegaron a la conclusión, aunque por razones diferentes, de que la verdadera ley de gravitación debe ser la de la inversa del cuadrado, conclusión a la que había llegado Newton con tanta anterioridad como 1666 (p. 216), como deducción de la tercera ley de Kepler: pero aún faltaba una prueba más: si los planetas giraban alrededor del Sol por la atracción de esta fuerza, ¿describirían elipses como había asegurado Kepler desde un principio? Halley decidió ir a Cambridge y consultar con Newton esta cuestión. Cuando se entrevistaron dijo Newton inmediatamente que las trayectorias debían ser elipses y explicó que él había estudiado el problema algunos años antes, pero que había equivocado los cálculos; por segunda vez, pues, había tenido en sus manos la solución de gran parte del problema del universo astronómico y lo había dejado sin resolver. Pero esta vez, sin embargo, prometió restablecer los abandonados cálculos y, no sólo lo hizo así, sino que al mismo tiempo, incitado por Halley, escribió sus resultados y los envió a la Royal Society.

Oportunamente se publicó el manuscrito bajo el título de *Philosophiæ naturalis principia mathematica,* que, por lo general, se abrevia llamándolo *Principia.* Esta obra es verdaderamente la más grande obra científica que produjo jamás el intelecto humano. Ninguna otra, con la posible excepción del *Origen de las especies,* de Darwin, ha producido influencia tan grande sobre el pensamiento contemporáneo. Porque en ella se explica gran parte de la naturaleza inanimada en términos mecánicos, y su-

giere que todo lo demás debe explicarse de manera semejante. La clave de la explicación está, naturalmente, en la ley de la gravitación universal. La investigación es en total un ejemplo perfecto del verdadero método científico tal como lo describe Leonardo (p. 148). En el prólogo expone Newton que "las fuerzas de la gravitación, por las cuales tienden los cuerpos hacia el Sol y los diferentes planetas", pueden descubrirse "por los fenómenos celestes". Habiendo descubierto lo que son estas fuerzas, en seguida deduce, por análisis matemático, "los movimientos de los planetas, de los cometas, de la Luna y del mar" (Newton está pensando en las mareas cuando dice esto). Continúa así:

> Quisiera que pudiéramos derivar el resto de los fenómenos de la naturaleza por el mismo género de razonamiento, mediante principios mecánicos; porque me siento inducido a sospechar, por muchas razones, que todos ellos dependen de ciertas fuerzas, mediante las cuales las partículas de los cuerpos, por causas hasta ahora desconocidas, se impelen mutuamente hacia otras y se unen en figuras regulares, o bien se repelen y se apartan unas de otras; siendo desconocidas estas fuerzas, los filósofos han intentado en vano hasta ahora investigar la naturaleza.

De acuerdo con este plan, el primer libro inquiere cómo puede investigarse matemáticamente el movimiento de los cuerpos sobre los que actúan fuerzas conocidas. Los experimentos de Galileo habían revelado la relación entre movimiento y fuerza, y Newton adopta por completo el sistema mecánico de Galileo, expresándolo en los dos primeros de sus tres *axiomas* o *leyes del movimiento*.

Ley I. Todo cuerpo mantiene su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, a menos que sea impulsado o cambiado por fuerzas que actúen sobre él.

Ley II. El cambio de movimiento (o sea la cuantía del cambio de *momentum,* o momento) es proporcional a la fuerza motriz impresa, y tiene lugar en la dirección en que tal fuerza actúa.

Antes de enunciar estas leyes, Newton dio cierto número de definiciones que tenía por objeto explicar la terminología empleada en ellas.

Estas definiciones y los axiomas o leyes del movimiento se fundamentan de modo análogo que los axiomas de la geometría de Euclides y han tenido en gran parte la misma fortuna. Pensó Euclides que podía comenzar estableciendo unos pocos axiomas (verdades tan evidentes que no necesitan demostración) y de ellos deducir toda la geometría. Después de haber permanecido indiscutibles durante 400 años aproximadamente, Ptolomeo advirtió que no eran tanto axiomas como hipótesis; ahora, pasados 2 000 años, hemos aprendido a considerarlos como especificaciones del género de espacio al cual se aplican los teoremas de Euclides. De igual manera, las definiciones y los axiomas de Newton permanecieron más o menos indiscutibles durante 200 años, hasta que E. Mach, un profesor vienés, determinó que las supuestas definiciones no eran definiciones sino hipótesis; especificaban un género particular de sistema mecánico, el género particular de sistema al cual se aplican los teoremas de los *Principia.*[31] Newton define, en primer lugar, la masa, la cual, dice, es el volumen de un cuerpo multiplicado por su densidad. Mas, como la densidad sólo puede definirse como la masa de un cuerpo dividida por su volumen, esto no nos lleva a ninguna parte. Lo que hace realmente la definición de Newton es introducir tácitamente la presunción de que todo cuerpo ha asociado en sí mismo una cantidad que posee las varias propiedades que él subsecuentemente asigna a la masa. Una de estas propiedades es que la masa de un objeto en movimiento permanece inalterable cuando cambia la velocidad del movimiento; sabemos ahora que esto no es verdad (p. 339).

Newton inmediatamente después define el *momento* (cantidad de movimiento) como la masa de un objeto multiplicada por su velocidad, y esto a su vez plantea la cuestión de cómo se ha de definir la velocidad de movimiento. Nosotros decimos que un carruaje marcha a la velocidad de 60 kilómetros por hora cuando pasa una piedra miliar (marcando kilómetros) cada

minuto; pero debemos recordar que las piedras miliares no están en reposo, sino que marchan en rápido movimiento con la rápida rotación de la Tierra. El movimiento del carruaje en la carretera da una rapidez de 60 kilómetros por hora según las piedras miliares; pero éstas tienen a su vez una mayor rapidez de acaso 500 millas por hora debido a la rotación de occidente a oriente de la superficie de la Tierra. A todo esto debemos superponer una todavía mayor rapidez de 70 000 millas por hora porque la Tierra se mueve en su órbita alrededor del Sol y aun otra de acaso 600 000 millas por hora porque el Sol se mueve entre las estrellas, y así sucesivamente, acaso hasta el infinito. No sabemos de nada que esté finalmente en reposo y pueda proporcionarnos un punto de referencia fijo comparado con el cual se pueda medir el movimiento. Podemos, naturalmente, *suponer* que si continuáramos bastante lejos por ese camino llegaríamos al fin a encontrar algo que poseyera la necesaria propiedad de inmovilidad absoluta; pero esto sería pura hipótesis. No obstante, ésta fue la determinación que tomó Newton; asumió que las más remotas partes del universo contenían vastas masas inconmovibles, comparadas con las cuales podían medirse los movimientos de los demás objetos. Claramente vio que esto era únicamente una hipótesis para facilitar el trabajo: "Puede ser que no haya realmente ningún cuerpo en reposo al cual puedan referirse los lugares y los movimientos de otros cuerpos", y en todo caso vio las dificultades de esta hipótesis:

> Es en verdad extremadamente difícil descubrir y distinguir la efectividad del verdadero movimiento de cuerpos particulares juzgando por la apariencia; porque las partes del inconmovible espacio en el cual se ejecutan estos movimientos no se presentan en manera alguna a la observación de nuestros sentidos.

Sabemos ahora que la hipótesis de "vastas masas inconmovibles" no estaba apoyada por garantía alguna, de suerte que la manera de tratar Newton el reposo y el movimiento carecía de justificación, y exactamente igual ocurrió con su modo de considerar el tiempo. Decía que el tiempo es algo que "fluye uni-

formemente sin relación con ninguna cosa externa"; pero ésta, naturalmente, no es una definición; en el caso más favorable expone una simple y supuesta propiedad del tiempo, e incluso sucede que no es una verdadera propiedad.

Exactamente 200 años después que Newton había enunciado estas hipótesis, un experimento hecho por Michelson y Morley hizo surgir la sospecha de que no eran una verdad universal en la naturaleza, pero el asunto no se puso en claro definitivamente hasta que apareció la teoría de la relatividad de Einstein, a principios del siglo XX (p. 338). Demuestra ésta que las suposiciones de Newton de espacio absoluto y de tiempo absoluto, como se denominaban corrientemente, invalidaban su mecánica para los objetos dotados de movimientos rápidos, incluyendo los rayos de luz, pero no para los objetos que se mueven más lentamente a los cuales la aplicaba Newton.

La segunda ley presenta el nuevo concepto *fuerza,* pero Newton no pudo definir lo que es la fuerza. Lo más que podemos captar es que la fuerza es lo que cambia el momento, y que la magnitud del cambio es proporcional a la magnitud de la fuerza que lo produce. No se nos ha dicho aún cómo medir la fuerza, pero ahora nos lo dice la segunda ley: una fuerza es el doble de otra si produce doble cambio en el momento (cantidad de movimiento). De esta suerte es más bien considerada como una definición de *cantidad de fuerza*.

Después Newton presenta una tercera ley:

Ley III. A toda acción se opone siempre una reacción igual.

De esta manera, las dos fuerzas que ejercen dos objetos actuando mutuamente uno sobre otro son iguales en cantidad, pero actúan en sentidos opuestos. Ahora, por lo menos, se nos dice algo nuevo (un hecho físico real) acerca de las fuerzas; si un caballo tira de un carro con una fuerza *x,* entonces el carro ejerce un tirón hacia atrás de valor *x* sobre el caballo. Si un ca-

ñón dispara y cambia su momento en *y*, entonces el cañón adquiere un momento de retroceso igual a *y*. Las leyes I y II las tomó íntegramente de Galileo, pero la ley III era propia de Newton.

La mecánica de Galileo se había limitado a la Tierra y a cómo proceden los cuerpos terrestres; pero Newton quería demostrar que los movimientos de los cuerpos celestes podían explicarse con base en principios similares. Da comienzo al tercer libro de los *Principia* diciendo que "resulta que, utilizando los mismos principios, yo demuestro ahora la estructura del sistema del mundo", y procede a edificar una mecánica completa de los cielos. Demuestra que, si la gravitación sigue la ley de la razón inversa del cuadrado, entonces los planetas deben moverse exactamente de acuerdo con las tres leyes de Kepler. Estudia otros muchos géneros de movimiento como, por ejemplo, el movimiento de un planeta cuando además de la atracción gravitatoria del Sol actúan sobre él otras fuerzas. Considera también el movimiento que resulta cuando tres o más cuerpos se atraen mutuamente en forma gravitatoria, como, por ejemplo, el Sol, la Luna y la Tierra. Éste es el famoso problema de los tres cuerpos, del cual no se ha obtenido todavía la completa solución.

Ya en 1672 Richer había descubierto que los relojes de péndulo tendían a retrasarse en Cayena y se encontró que lo mismo ocurría en otras regiones próximas al ecuador. Esto demostraba que la gravitación de la Tierra era menos intensa cerca del ecuador que en otra parte cualquiera, y dio a pensar que la Tierra podía no ser perfectamente esférica, sino de forma de naranja, más acomodada en el ecuador y más aplastada en los polos (como se ve que es Júpiter). Probó Newton que si la Tierra era achatada por los polos, la tracción de la Luna sobre su abultamiento ecuatorial tendería a llevar su ecuador al plano en que la Luna describe su órbita alrededor de la Tierra. Esto ex-

plicaba en seguida la “precesión de los equinoccios” que había descubierto Hiparco en el siglo II a. C.; la Tierra no podía girar alrededor de un eje fijo, como lo hace un peón durante todo el tiempo de su giro, porque la Luna estaba, para siempre, haciendo dar vueltas al eje de aquélla.

También Newton mostró cómo la atracción gravitatoria de la Luna y del Sol producen las mareas en los océanos que envuelven la superficie terrestre, y estudió la teoría de tales mareas con algún detalle, presentando de manera convincente que las mareas observadas eran precisamente como las tenía que producir la gravitación.

Kepler había afirmado que todos los planetas conocidos se mueven describiendo elipses alrededor del Sol, y Newton demostró que así debían hacerlo si su movimiento era determinado por la gravitación del Sol y, no obstante, que todos describían elipses difícilmente distinguibles de círculos. La teoría de Newton permitía que los cuerpos describieran alrededor del Sol elipses de cualquier alargamiento y aseguró que algunos de los cometas observados en el pasado debieron describir trayectorias en elipses muy alargadas. Esta parte especial de los *Principia* alcanzó destacada prominencia después que Halley estudió los cometas en 1680. Encontró que un cometa aparecido en 1682 seguía prácticamente la misma trayectoria que anteriores cometas aparecidos en el firmamento en 1531 y en 1607. Esto hizo pensar que los tres cometas eran las apariencias de un solo cuerpo celeste que se movía alrededor del Sol en órbita muy alargada que tardaba en recorrer 75 años y medio. Predijo Halley que este cometa volvería pasados otros 75 años y medio. Así ocurrió; y aquellos extraños objetos, que hasta entonces se habían considerado como presagios de catástrofe o de cólera divina, fueron ya considerados como meros bólidos de materia inerte que se movían como la ley de gravitación los obligaba a moverse.

Otra también importante sección de los *Principia* trata del movimiento en los fluidos, y adquirió especial importancia por su conexión con la teoría de los torbellinos de Descartes. Newton demostró que los movimientos planetarios que se produjeran a la manera que había imaginado Descartes no podían obedecer a las leyes de Kepler, lo que dio un golpe mortal a la teoría de los torbellinos. A pesar de esto, esta teoría se mantuvo en el continente durante algún tiempo, y hombres de ciencia prominentes como el astrónomo francés de Fontenelle (1657-1757) y el físico matemático Johann Bernoulli, de Groninga y Basilea (1667-1748) permanecieron como discípulos de Descartes hasta sus últimos días. Halló favor particularmente en Francia, hasta que Voltaire defendió las teorías de Newton y acabó con la de Descartes.

La siguiente astronomía telescópica

Poco queda que decir acerca de la astronomía del siglo XVII. En astronomía dinámica había avanzado Newton tan rápidamente, y dejó tan rezagados a sus colegas de trabajo, que hubo de pasar largo tiempo antes de que se hicieran nuevos progresos en senda tan brillantemente abierta. En astronomía observacional el telescopio había dado paso a inmensas posibilidades, de las que no tardaron en aprovecharse los observadores. Hemos visto cómo Galileo había tomado nota de dos patentes apéndices de Saturno en 1610, los cuales interpretó como pequeños cuerpos esféricos en contacto con el mayor cuerpo esférico del planeta en los opuestos extremos de un diámetro (p. 203). Halló Hevelius que ellos iban y venían con regular periodicidad, pero su verdadera naturaleza se mantuvo desconocida hasta 1655, cuando Huygens vio que eran las partes salientes de un delgado anillo que rodeaba al planeta en su ecuador, y tan delgado que se hacía invisible cuando la Tierra se encontraba en su plano. En el mismo año descubrió el principal satélite de

Saturno: Titán. Durante los 30 años siguientes, Cassini, espíritu director del Observatorio de París, descubrió cuatro más. También descubrió que el anillo que había visto Huygens alrededor de Saturno está dividido en dos partes separadas, por lo que se conoce todavía como la *división Cassini*. Después de esto vinieron rápidos y abundantes los descubrimientos en astronomía descriptiva.

El telescopio de aquellos primeros tiempos era admirable para revelar las maravillas de los cielos, pero no era tan a propósito para usarlo como instrumento de precisión, puesto que no facilitaba los medios para hacer medidas exactas de las posiciones y movimientos de los cuerpos celestes. El valor del telescopio aumentó en gran escala tan pronto como se inventaron los dispositivos auxiliares para medir distancias y movimientos con toda exactitud. Entre éstos se encontraba, sobre todo, el micrómetro, instrumento que tomó diferentes formas y que fue inventado más de una vez. El hilo de la tela de araña es excesivamente fino; pero una hebra suya, puesta en conveniente posición en un telescopio, es suficientemente gruesa para ocultar la luz de una estrella elegida, de suerte que nada de ésta llegará al ojo del observador que mira por el telescopio. Si el hilo de tela de araña cambia de posición, puede ocultar la luz de una segunda estrella. Por consiguiente, si un observador puede medir la distancia en que se ha desplazado aquella hebra desde que ocultó la primera estrella, puede estimar la distancia exacta a que están ambas estrellas en el firmamento; naturalmente, no la distancia en unidades de longitud, sino la distancia angular, el ángulo que tiene que girar el telescopio para que una estrella ocupe la posición que otra ocupaba anteriormente. El inglés William Gascoigne diseñó y empleó hacia 1640 un instrumento de esta clase, pero su invención parece que murió con él. Posteriormente, Huygens y Auzout y Picard, del Observatorio de París, inventaron otros micrómetros, fundados esencialmente en

el mismo principio, con los que los astrónomos pudieron medir pequeñas distancias angulares con gran exactitud. La invención del reloj de péndulo por Huygens proporcionó medios análogos para la medida exacta de pequeños intervalos de tiempo.

Armados con éstos y otros instrumentos similares, quedaron los astrónomos pertrechados para proceder a un estudio exacto de los fenómenos del firmamento, midiendo y catalogando las posiciones y los cambios de posición de los cuerpos celestes con un grado de exactitud siempre creciente. En 1672, Cassini en París y Richer en Cayena colaboraron en determinar la distancia de Marte, usando precisamente el mismo método que el agrimensor corriente emplea para determinar la distancia de un punto inaccesible, tal como la cima del Monte Everest. De esta manera pudieron deducir la distancia a que está el Sol, o el radio de la órbita de la Tierra, y las dimensiones generales del sistema solar. Estimaron la distancia al Sol como aproximadamente de 87 000 000 de millas (140 000 000 kilómetros), la cual puede compararse con la mayor precisión moderna de 93 003 000 millas (alrededor de 150 000 000 kilómetros). Se hicieron medidas semejantes para otros cuerpos del sistema solar, pero las distancias a las estrellas no se midieron hasta 1838.

Los pormenores de estos progresos no deben detenernos en este lugar, excepto en lo referente a uno que fue importante por sus consecuencias de largo alcance. Hemos visto cómo uno de los primeros frutos de la labor astronómica de Galileo fue el descubrimiento de los cuatro principales satélites de Júpiter. El más interno de éstos hacía su revolución alrededor del planeta una vez cada 42 horas y media aproximadamente, y quedaba eclipsado una vez en cada revolución al pasar a la sombra de Júpiter. Los otros satélites mostraban periodicidades análogas, pero de mayor duración. Si las revoluciones de los satélites se hubieran repetido en intervalos de tiempo absolutamente regu-

lares, habrían proporcionado un reloj astronómico sumamente valioso, el cual, como había dicho Galileo, podía emplearse para determinar longitudes en el mar (p. 208).

Cassini había calculado tablas de tiempo para los eclipses de los satélites de Júpiter, los cuales, pensaba, podrían usarse para tal objeto, y de hecho se emplearon en tierra para determinar las longitudes de varias partes inexploradas de la superficie de la Tierra. Pero cuando el astrónomo danés Römer se puso, en el año de 1676, a la obra de reobservar los satélites de Júpiter con intención de mejorar las tablas, se encontró con que los eclipses no se observaban a intervalos absolutamente regulares; algunas veces ocurría un pequeñísimo tiempo antes que el señalado en la tabla y otras veces un poco después. Más tarde notó que se adelantaban cuando Júpiter estaba más cerca de la Tierra, y se retrasaban cuando estaba más lejos (la luz que ellos enviaban llegaba retrasada después de una larga jornada). Esto daba a entender que había invertido tiempo en viajar a través del espacio, y halló que todas las observaciones podían explicarse mediante esta hipótesis. La amplitud de variación en los tiempos en que se veían los eclipses, aproximadamente 22 minutos, debía ser el tiempo que empleaba la luz en atravesar una distancia igual al diámetro de la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol. Combinando esto con la determinación de Cassini del tamaño de esta citada órbita, Römer expuso como conclusión que la luz debe viajar a razón de unas 192 000 millas por segundo; se sabe hoy que su velocidad exacta es la de 299 770 kilómetros o 186 300 millas por segundo.

Dos mil años antes que Römer, Empédocles había enseñado que la luz invierte tiempo en su jornada a través del espacio (p. 61). Aristóteles aceptó esto, apoyado en el fundamento general de que "cuando una cosa está en movimiento, se mueve desde un lugar a otro y, por consiguiente, debe transcurrir un cierto tiempo durante el cual se mueve. Hay un tiempo en que no se

veía el rayo, porque estaba transmitiéndose a través del medio". No obstante, otros más modernos tuvieron la opinión de que la luz se propagaba instantáneamente a través del espacio. Kepler lo creyó así fundándose en que la luz era inmaterial y por tanto no podía oponer resistencia alguna a fuerzas cualesquiera que se propagaran a través del espacio. Descartes lo creyó asimismo, apoyándose en que vemos la Luna eclipsada en el momento mismo en que se halla opuesta al Sol, y no algún tiempo después, como debería ocurrir si la luz invirtiera tiempo en propagarse por el espacio aunque, como señaló Huygens, esto no significa que la luz viaja instantáneamente, sino que su velocidad es demasiado grande para ser descubierta por las toscas medidas que se pueden hacer durante un eclipse. Galileo tampoco estaba convencido y trató de medir el tiempo que la luz empleaba en propagarse hasta un espejo distante y retroceder; pero sin éxito; la luz se propagaba demasiado rápidamente para que pudiera medirse el tiempo que empleaba en atravesar distancias terrestres con los métodos de que podía disponer Galileo. Römer, utilizando distancias astronómicas, había probado entonces, fuera de toda discusión, que la propagación no era instantánea; pero los resultados que halló no se aceptaron de modo general hasta que Bradley lo confirmó por un método absolutamente diferente (p. 279).

Óptica física

Después de la astronomía fue la óptica la ciencia que hizo los mayores progresos durante el siglo XVII, debiéndose también la principal contribución de estos progresos a Newton. Hemos visto cómo los griegos habían conocido las leyes fundamentales de la propagación de la luz (que marchaba por el espacio vacío en línea recta, y que era reflejada por un espejo de tal modo que el rayo incidente y el reflejado formaban ángulos iguales con la

superficie reflectora). Luego Ptolomeo, o posiblemente algún otro de su tiempo, estudió la refracción, y determinó una ley, que si no exacta, era lo bastante buena para su propósito.

Con estas leyes como cimiento para nueva edificación, los griegos de la última época estudiaron con cierta intensidad la óptica, así como los árabes, en particular Alhacén (p. 129) y los hombres de ciencia europeos medievales desde Roger Bacon en adelante (p. 139). Habían aprendido éstos a construir lentes y espejos, y entendían que podían utilizarse para cambiar la convergencia o divergencia de un haz luminoso, y concentrar sus rayos en un foco. Esta vía investigadora alcanzó su ápice con la invención del telescopio, a principios del siglo XVII, y su perfeccionamiento en manos de Galileo, Kepler, Huygens y otros. En 1621, Willebrord Snell, profesor de matemáticas de la Universidad de Leiden, descubrió la verdadera ley de refracción, pero no la publicó, de suerte que permaneció desconocida hasta que Descartes la anunció en 1637; no se sabe si ello fue como resultado de un descubrimiento independiente o de cualquier otro origen.

De todo esto nació la ciencia de los instrumentos de óptica; sus principios básicos se establecieron a fines del siglo XVII, y sus desarrollos posteriores en lo tocante a los detalles y la tecnología no nos interesan ahora.

Todo esto forma parte de lo que hoy describimos como *óptica geométrica,* la cual se ocupa en los problemas puramente geométricos que tienden a hallar qué camino tomarán los rayos de luz propagándose en línea recta, salvo cuando sufren la refracción en la interfase con un medio diferente. Hay una segunda rama de la óptica conocida como *óptica física,* que trata de una cuestión muy diferente: de qué sea la luz, y de por qué se comporta como lo hace. Esta rama apenas comenzó a existir a comienzos del siglo XVII.

Ya hemos visto que Euclides y Ptolomeo habían tenido un concepto equivocado sobre la naturaleza de la luz y de la visión. Siguieron a los pitagóricos, considerando la luz como una emanación ocular, que explora hasta que cae sobre el objeto que el órgano de visión está buscando. Pero Alhacén había dado una explicación exacta del acto de la visión en un tratado que era todavía el libro de texto modelo sobre óptica en el siglo XVII.

Kepler desarrolló más las doctrinas de Alhacén en su *Ad vitellionem paralipomena* (1604) y *Dioptrice* (1611). Describió la visión como la "sensación de un estímulo de la retina", y decía que la lente o cristalino del ojo forma una imagen del objeto de la visión sobre la retina. Creía que la retina contenía un espíritu sutil: el *spiritus visivus,* el cual se descomponía cuando la luz caía sobre él a través del cristalino, a la manera de cómo una materia combustible emprende un cambio químico cuando la luz del Sol la hiere a través de una lente: notable anticipación de la "púrpura visual", cuyos cambios químicos producen la sensación visual, como ahora se sabe. Señalaba que el cambio químico en el *spiritus visivus* debe ser algo duradero, puesto que una imagen persiste en la retina durante un corto tiempo después de mirar a una luz brillante. Explicaba la miopía y la presbicia, con entera exactitud, como debidas a que el cristalino concentra los rayos de luz en un foco que no coincide con la retina. Explicaba asimismo, y también con igual certeza, que estimamos la distancia de un objeto debido a la pequeña diferencia entre las direcciones en que nuestros dos ojos tratan de verlo: nosotros de manera subconsciente "resolvemos" el triángulo que tiene como vértice el objeto distante y la línea que une nuestros dos ojos como base.

Todo esto significaba progresos sustanciales; pero no convenció a nadie. En particular, Descartes volvió a la antigua idea de que la luz era una emanación del órgano de la visión.[32] De-

cía que vemos los objetos a nuestro alrededor como un ciego los siente con su bastón. Precisaba estas ideas suponiendo que la luz se propagaba instantáneamente por medio de presiones de partícula a partícula del medio que suponía llenara el espacio. Edificando sobre esta falsa base, Descartes construyó una prueba errónea y no convincente de las leyes de la óptica, la cual consiguió algún crédito en aquel tiempo e indudablemente demoró la aceptación general del descubrimiento de Römer de la velocidad finita de la luz. Dedicó parte de su meditación a la naturaleza de la luz, y supuso que las diferencias de color eran producidas por partículas girando a diferentes velocidades, de manera que las partículas que giraban con mayor rapidez producían la sensación del rojo, mientras que las rotaciones más lentas producían sensaciones de amarillo, verde y azul, en este orden.

Pero ninguno llegó suficientemente lejos para dar una respuesta convincente a la cuestión fundamental de "lo que la luz es" o una satisfactoria explicación del origen y significado del color. Muchas conjeturas flotaban en el aire, pero no había bastante conocimiento experimental que pudiera utilizarse para comprobarlas. Con la segunda mitad de este siglo llegó un gran aumento de conocimiento del género justamente necesitado.

Grimaldi (1618-1663). En 1665 se publicó en Bolonia un libro titulado *Physico-Mathesis de lumine, coloribus, et iride,* obra póstuma del jesuita Francesco Grimaldi, que había sido profesor de matemáticas en la universidad. Contenía la primera descripción del fenómeno de "difracción" (fenómeno en el cual se muestra la cualidad ondulatoria de la luz del modo más claro y convincente) y daba cuenta de un cierto número de experimentos sobre este punto. Bastará considerar uno de los más sencillos experimentos de Grimaldi.

En la figura VI.3., dos pantallas, en las cuales se han cortado unos pequeños agujeros, *a* y *b,* se ven en sección transversal, en tanto que debajo de ellos hay una tercera pantalla, paralela a las otras dos, que se ha dejado intacta. Si se envía directamente una fuerte luz sobre la abertura de la pantalla superior, se iluminará parte del fondo, y parte quedará en la sombra. Si la luz se propagara en línea recta, se vería fácilmente que la parte comprendida dentro del trozo *c* recibe alguna iluminación, débil o fuerte, pero que las porciones que quedan fuera de este trozo permanecen en completa oscuridad, puesto que la luz sólo podría alcanzarlas inclinándose en los bordes. Pero Grimaldi halló que, como hecho real, la iluminación se extendía mucho más allá del trozo *c,* demostrando así que la luz no se limitaba a propagarse en línea recta. Grimaldi y los experimentadores que le siguieron ejecutaron muchas variaciones de este sencillo experimento y todas dieron el mismo resultado. Grimaldi encontró, además, que no había una brusca transición de la luz a la oscuridad en el límite de la sombra, sino una banda de colores irisada, que pensó tendría el mismo origen que el arco iris. El límite de la sombra no sólo estaba coloreado, sino que mostraba alteraciones rítmicas de luz y oscuridad. Le recordaban éstas la sucesión de rizos en círculos concéntricos que se producen cuando se arroja una piedra a un charco, y le llevó a suponer, como Leonardo había supuesto anteriormente, que la luz es algo que va asociado con el movimiento ondulatorio. Consiguió bandas de colores semejantes reflejando la luz del Sol en una lámina metálica en la cual había grabado un gran número de líneas paralelas muy próximas entre sí. Este instrumento toscamente hecho fue el primer ejemplo de la "red de difracción" que forma hoy parte esencial en el equipo de todo laboratorio de óptica.

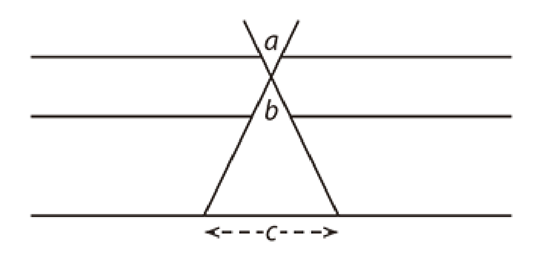


FIGURA VI.3.

Todo esto constituía un caudal de prueba experimental de las cuestiones de la naturaleza de la luz y significación del color. Pero Grimaldi no emitió ninguna opinión aprovechable fuera de insistir en que el color es una modificación de la luz que resulta en algún modo de la estructura íntima de la materia.

HOOKE. En el mismo año de 1665 se publicó en Inglaterra otro libro, titulado *Micrographia,* de Robert Hooke (p. 213). Había experimentado éste con varias láminas delgadas de sustancias en las cuales se podían ver colores iridiscentes: láminas de mica, pompas de jabón, manchas de aceite flotando en el agua, y así sucesivamente. Halló que el color que se veía en cada punto dependía del grosor de la capa de materia. En lugares donde el grosor cambiaba gradualmente, había, por consiguiente, una banda de colores continuamente cambiantes, y Hooke descubrió que en tales lugares los colores eran los mismos del arco iris, y se presentaban en el mismo orden que en éste.

Imaginó que la luz blanca ordinaria era producida por rápidas vibraciones de partículas del cuerpo luminoso y que estas vibraciones emanaban del cuerpo luminoso en pulsaciones esféricas. Aparecía el color dondequiera que se perturbaba la emisión simétrica de estas pulsaciones. Los “colores fundamentales”, azul y rojo, resultaban de que las pulsaciones se hacían “oblicuas y confusas” de maneras diferentes: azul cuando la parte débil de la pulsación se propagaba en primer lugar y rojo cuando lo hacía en último lugar.

Newton. En medio de toda esta confusión, vino Newton, para quien, según palabras de Einstein,

> la Naturaleza era un libro abierto cuyas letras leía sin esfuerzo. Las concepciones que utilizó para poner en orden el material de experiencia parecieron brotar espontáneamente de la misma experiencia, de los bellos experimentos que situó en orden como juguetes, y que describe con amorosa riqueza de detalles. En una misma persona se combinaban el experimentador, el teórico, el mecánico y, no menos, el artista en el modo de hacer la exposición. Permanece en pie ante nosotros, fuerte, seguro y solitario.[33]

Cuando aún era estudiante en Cambridge, Newton había leído la *Dioptrice* de Kepler y él mismo se había ocupado en pulir lentes y en pensar en las posibilidades de los telescopios. En 1666 compró un prisma en la feria de Stourbridge, cerca de Cambridge, con objeto de "ensayar con él los tan celebrados fenómenos de los colores". El empleo que hace de esta frase demuestra que los colores del prisma eran bien conocidos en aquel tiempo; verdaderamente, nosotros sabemos que el diamantista tallaba sus piedras preciosas de manera que mostraran los colores lo mejor posible. Un prisma que estaba en venta en una feria local pudo muy bien haber sido poco más que un juguete, pero con aquel juguete Newton iba a descubrir el secreto del color.

Parece que al principio no sobrevino ningún descubrimiento. Porque muy poco después de aquella compra estuvo ayudando al doctor Barrow, su predecesor en la cátedra de matemáticas de Cambridge, a revisar para publicación sus lecciones de óptica. Aparecieron éstas en 1669, año en que Newton sucedió a Barrow en el profesorado, y Barrow en ellas había expuesto de manera enteramente fantástica ideas imposibles sobre el significado del color: el blanco es una luz "copiosa"; el rojo es luz condensada interrumpida por intersticios de sombra; el azul es luz enrarecida, como en los cuerpos en que alternan partículas azules y blancas, como en el éter puro o en el mar, donde la sal blanca está mezclada con agua oscura; y así sucesi-

vamente. Con dificultad imaginamos a Newton dando todo esto a imprimir si entonces hubiera sabido más acerca de este punto.

Su primera descripción de experimentos con su prisma la publicó en 1672. Fue éste su primer documento científico, y uno de los poquísimos que publicó sin necesidad de presión ni persuasión de sus amigos. Por él fue tan ferozmente atacado, y le comprometió en tanta controversia, que parece que llegó a molestarle toda discusión científica y a repugnarle publicar cualquier cosa que fuere por temor a la crítica y a la controversia; no aguantaba la crítica.

Su primer experimento reveló el auténtico significado del color. Hizo un pequeño orificio en la persiana de su habitación al través del cual podía entrar un pequeño haz de luz solar en dicha habitación y pasar a través del prisma (fig. VI.4.). Halló que el haz de luz se extendía en una banda coloreada de luz (un *espectro*), en la cual se veían todos los colores del arco iris, desde el rojo al violado, en el mismo orden que en el arco iris; esta banda era unas cinco veces más larga que ancha. Cualquier otro pudo hacer la misma cosa, e indudablemente muchos la hicieron; la diferencia estaba en que Newton se puso a la obra para averiguar por qué el espectro se dispersaba de esta manera. El prisma había, naturalmente, dispersado la luz violeta y la roja de la posición que habría ocupado en otro caso, pero el espectro mostraba que el prisma había dispersado el violeta más que el rojo. Se había revelado la primera parte del secreto: colores diferentes significaban diferentes grados de refrangibilidad; un rayo de luz violada se refractaba en ángulo mayor que otro de luz roja cuando encontraba una superficie que produjera refracción. Para comprobar esta conclusión, Newton hizo que luces de colores variados del espectro sufrieran una segunda refracción en ángulos rectos con la primera. Hízolo con objeto de ver si éstos experimentaban simplemente el mismo grado de

desviación o si sufrían otros y nuevos cambios, como, por ejemplo, descomponiéndose todavía más en otros colores. Halló que los diferentes colores de la luz se mantenían idénticos al pasar por la segunda refracción; el rojo permanecía rojo y el violado permanecía violado, y cada uno de ellos experimentaba justamente la misma cuantía de refracción que antes. Continuó extendiendo y restringiendo sus observaciones en una serie de experimentos muy bien planeados y, finalmente, anunció su conclusión de que la luz del Sol era una mezcla de luces de todos los colores del arco iris, siendo los colores cualidades permanentes (o, como decía Newton, "originalmente e innatas") de varios ingredientes, los cuales experimentaban la refracción en grados diferentes.

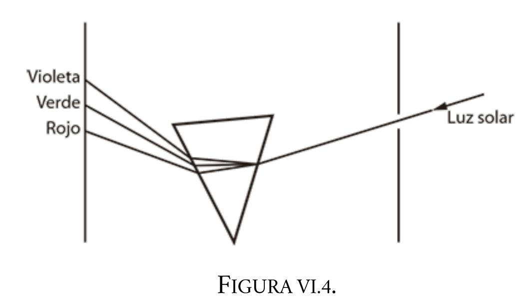


FIGURA VI.4.

Aquello dio, por lo menos, una contestación parcial a la interrogación de qué sea el color, pero la cuestión más fundamental de qué es la luz quedó todavía sin contestar.

Mas, a pesar de que las teorías de Newton sobre el color habían sido comprobadas y atacadas de todas las maneras imaginables, no llevaron la convicción a todo el mundo. Hooke y otros varios las criticaron, y de ello resultó una viva y prolongada discusión, durante la cual vino a primer plano frecuentemente la cuestión de la naturaleza de la luz. Newton vacilaba en comprometerse acerca de esta cuestión; pero tuvo que referirse a los puntos de vista de otros individuos para defender su propia teoría del color. Por ejemplo, indicó en 1675 que la mencionada hipótesis de Hooke al respecto (p. 238) podía in-

terpretarse mejor suponiendo que se podía excitar a los cuerpos de tal manera que causaran vibraciones del éter "de varios grados de magnitud", y que la de mayor consideración produce la sensación del color rojo, y la de menor, o de onda más corta, la sensación del violeta oscuro, y las longitudes intermedias, sensaciones de colores intermedios, exactamente igual que las ondas aéreas "según su tamaño dan sonidos de diferentes tonos". En resumen, sugería la asociación de diferentes colores con las vibraciones del éter de diferentes longitudes de onda, que es lo que constituyó precisamente la teoría ondulatoria un siglo después. Pero Newton proponía estas interpretaciones de la luz y del color únicamente como perfeccionamientos en la teoría de Hooke, y no como creencias suyas. Es verdad que en seguida dice que le gustaría otra teoría mejor, y que la suya es una mezcla de la corpuscular y la ondulatoria. La luz empieza como partículas que excitan ondulaciones en el éter, pero que no son ellas mismas ondulaciones. "Suponiendo que los rayos de luz sean corpúsculos emitidos en todas direcciones por las sustancias brillantes, cuando ellos chocan con cualesquiera superficie refringente o reflejante, deben excitar en el éter vibraciones de modo tan fatal como lo hacen las piedras arrojadas sobre el agua", y cree que pueden explicarse muchos fenómenos ópticos por la hipótesis de que las diferentes vibraciones son "de diferentes longitudes de onda de acuerdo con los dichos rayos corpusculares de varios tamaños y velocidades que las exciten". Añade que si tuviera que establecer una hipótesis, sería la antedicha, pero "expuesta con mayor generalidad, de suerte que no determine lo que es la luz si no es como una u otra cosa capaz de excitar vibraciones en el éter". Para los que necesitan hipótesis, presenta una definida que explica sus ideas.

Supone que hay "un medio etéreo, muy a la manera de la constitución del aire, pero mucho más rarificado, más sutil, y mucho más elástico". No es uniforme, sino que consiste en "el

principal cuerpo espeso de éter" mezclado con varios —espíritus etéreos; considera Newton que los fenómenos eléctricos y magnéticos y la gravitación parecen, todos, argüir en favor de tal mezcla. Por lo que se refiere a los fenómenos eléctricos, cree que cuando un trozo de vidrio electrizado atrae pequeñas partículas de papel, el movimiento del papel debe producirlo "algún género de materia sutil condensada en el vidrio, y enrarecida por el frotamiento"; este éter enrarecido puede circular por el espacio circundante, arrastrando con él los trocitos de papel, y volviendo finalmente al vidrio y recondensarse allí… y en lo que se refiere a la gravitación, cree que la atracción gravitatoria de la Tierra puede causarla "la continua condensación de algo tal como el espíritu etéreo, no del principal cuerpo del éter espeso, sino de alguna cosa muy fina y sutilmente difundida en éste, quizás de naturaleza untuosa y gomosa, tenaz y elástica". Y no obstante, la luz no es ni éter, ni sus movimientos vibratorios, sino algo de muy diferente género propagado desde los cuerpos luminosos. Esta puede imaginarse como "un agregado de varias cualidades peripatéticas" o como "multitudes de inimaginables pequeños y velocísimos corpúsculos de varios tamaños", que brotan de los cuerpos luminosos y que aumentan continuamente su velocidad hasta que la resistencia del éter los detiene, algo así como los cuerpos que cuando caen en el agua se aceleran hasta que la resistencia del agua equilibra la fuerza de gravedad.

Todo esto es muy vago, y, no obstante, es la única hipótesis sobre la naturaleza de la luz a la que Newton parece haber dado siempre su cautelosa aprobación. Extraña mezcla de las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz, evidentemente tendía a conseguir la ventaja de ambas, pero con la intención única de ayudar a la imaginación, y no como afirmación de una verdad absoluta.

Sobre ella, como sobre otras muchas cuestiones acerca de las cuales Newton no tenía claramente determinados puntos de vista suyos planteó unas ideas bajo la forma de “Preguntas” que publicó al final de su *Óptica.* En la pregunta 18, habiendo interrogado si el calor radiante no podría ser transportado por un “medio mucho más sutil que el aire”, continúa del modo siguiente: “Y, ¿no es este medio el mismo por el cual la luz se refracta y refleja, y por cuyas vibraciones la luz comunica calor a los cuerpos?” Pero en la pregunta 29 interroga así: “¿No son los rayos de luz cuerpos muy pequeños emitidos por las sustancias luminosas? Porque tales cuerpos pasarán a través de medios uniformes en línea recta sin inclinarse en la sombra, lo cual es la naturaleza de los rayos de luz”. Y, finalmente (pregunta 30): “¿No serán los cuerpos densos y la luz convertibles recíprocamente, y no podrán los cuerpos recibir gran parte de su actividad de las partículas de luz que entran en su composición?”

Tales parecen haber sido los pensamientos finales de Newton en cuanto a la naturaleza de la luz, desarrollados en forma de suposiciones. En el transcurso del cuerpo principal de su *Óptica* se había cuidado mucho de insistir en que sus resultados no se apoyaban en ninguna opinión especial sobre la naturaleza de la luz, y había tratado de modo evidente de evitar el empleo de palabras que parecieran implicar puntos de vista especiales. El hecho escueto parece haber sido que jamás fue capaz de determinar en su mente si la luz era corpuscular u ondulatoria; corrientemente escribía como si comenzara como corpúsculos y terminara como vibraciones que los corpúsculos hubieran excitado en un éter. Pero como la cuestión de los corpúsculos era más fácil de entender que la de las ondulaciones, y aportaba una explicación más evidente de la propagación lineal de la luz, se extendió la idea de que Newton había declarado que la luz era corpuscular.

La ciencia de 250 años más tarde pasó nuevamente por una fase de incapacidad para decidir si la luz consistía en ondas o en corpúsculos. Durante algún tiempo se pensó incluso que consistía en ambas cosas; pero ahora sabemos que no consiste ni en la una ni en la otra. Durante ese tiempo se dijo con frecuencia que Newton había mostrado gran perspicacia y luminosa presciencia al defender una teoría corpuscular y rechazar una teoría ondulatoria. Pero Newton jamás hizo esto, y aun si lo hubiera hecho, el encomio estaría injustificado. El propósito de Newton fue encontrar una teoría que explicara todos los hechos conocidos en su tiempo acerca de la luz. De estos hechos, ni uno solo, como ahora sabemos, requería una teoría corpuscular; cada uno, sin excepción, podía explicarse basado en una teoría ondulatoria, y fue, por consecuencia, explicado así. Los hechos que demostraron que una teoría ondulatoria pura era inadecuada no se conocieron hasta el final del siglo XIX. Por consiguiente, el hecho supuesto de que Newton rechazara la teoría ondulatoria y su defensa de una teoría corpuscular deben de haber impedido en gran medida el progreso de la óptica.

Huygens (1629-1695). Cuando Newton pensaba todavía en la naturaleza de la luz, y antes de que publicara su *Óptica,* estaba construyendo otra teoría, en Holanda, Christian Huygens, hijo de un poeta y diplomático holandés. Huygens no veía nada corpuscular en la luz, y se contentaba con tenerla como enteramente ondulatoria. Publicó primero su teoría en un escrito que leyó en la Academia de Ciencias de París, en 1678, y se publicó en forma completa y final en su *Traité de la Lumière* (1690). Como Descartes, Newton y otros de esta época, imaginaba que el espacio entero estaba lleno de un medio, un "medio muy sutil y elástico", y suponía que un objeto luminoso producía perturbaciones en dicho medio en intervalos de tiempo perfectamente regulares. Estos impulsos regulares producían ondulaciones regulares en el medio, las cuales se propagaban en todas direccio-

nes en la forma de ondas esféricas. Huygens suponía que cada punto de estas ondas contenía una perturbación, la cual formaba a su vez nueva fuente de ondas esféricas; de esta manera las ondas se propagaban por sí mismas.

Basado en esta hipótesis, pudo dar cuenta de cierto número de propiedades observadas en la luz. La ley de reflexión de la luz se explicaba con facilidad, y la presunción adicional de que la luz se propagaba con menos rapidez en medios densos condujo inmediatamente a la ley de refracción de Snell. También probó Huygens que la luz se propaga en línea recta, pero esto no quedaba enteramente libre de objeciones. Y había, además, otros fenómenos ante los cuales fallaba por completo la teoría.

Polarización de la luz. Si una lámina de vidrio se pone sobre una página impresa, vemos claramente las letras, aunque un poco desplazadas en razón de la refracción que éstas experimentan al pasar a través del vidrio. Pero si una lámina de calcita (espato de Islandia) se pone sobre la página, vemos cada letra duplicada, porque la calcita tiene la notable propiedad de romper cada rayo de luz que la atraviesa en dos distintos rayos que se propagan en direcciones diferentes (propiedad llamada *doble refracción*), la cual descubrió el físico danés Erasmo Bartolinus en 1670. La teoría de Huygens explicaba algunas de las propiedades de la calcita muy acertadamente, pero fallaba completamente en otras. Las teorías de Newton también fracasaban, aunque se aproximaban más a la verdad que lo que Huygens logró jamás, cuando sugirió que los fenómenos necesitaban rayos de luz que tuvieran "lados". En aquel momento estaba presentando el concepto de lo que ahora llamamos la *polarización* de la luz. Esta permite una interpretación muy sencilla, pero Newton no dio con ella.

En una onda sonora, cada partícula de aire se mueve en lo que se llama movimiento *longitudinal*; se mueve a uno y otro lado en la dirección en que se propagan las ondas. Por ejemplo,

en las ondas sonoras de una campana, cada partícula de aire se mueve alternativamente acercándose y alejándose de la campana. Es diferente en las ondas de agua en un estanque; las ondas se propagan por la superficie del estanque, pero las partículas individuales de agua no; su movimiento es de arriba abajo y, por tanto, en ángulos rectos con la superficie del agua; es *transversal* a la dirección en que las ondas se propagan.

Las ondas de Huygens habían seguido un movimiento longitudinal, pero entonces Hooke ideó que la luz podía consistir en ondas transversales, de manera que cada partícula de éter se moviera en ángulo recto respecto de la dirección en que la luz se estaba propagando, y esto implicaba que un rayo de luz tenía "lados" en el sentido newtoniano: dos lados en la dirección en que se movía la partícula, y dos más en una dirección que formaba ángulo recto con ésta y, asimismo, con la dirección de la onda.

Sólo con haber combinado estas sugerencias de Hooke y de Newton con los resultados obtenidos por Huygens, la teoría de la luz podía haberse establecido sobre una satisfactoria base ondulatoria, porque entonces no había hechos conocidos que no se hubieran podido explicar con esta teoría. Mas, tal como estaban las cosas, prevaleció la teoría corpuscular, supuestamente apoyada en la elevada autoridad de Newton, y mantuvo posesión del campo hasta el final del siglo próximo, cuando Young (1773-1829) y Fresnel (1788-1827) demostraron que todos los hechos entonces conocidos podían reconciliarse en una pura teoría ondulatoria (p. 293).

LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA

Después de la óptica, los progresos más dignos de nota en la física de aquel periodo fueron los que se referían a la estructura general de la materia, y a la interpretación del calor y del fuego.

Se reinstaló el átomo como unidad fundamental de la cual estaba compuesta toda materia, y se descubrieron los elementos químicos.

Hemos visto cómo Leucipo, Demócrito y Epicuro habían especulado sobre una estructura atómica de la materia en el siglo v a. C. Sus doctrinas habían sido combatidas en aquel tiempo a cuenta de suponerse que eran tendencias antirreligiosas, y la Edad Media las había abandonado por completo. Las resucitó entonces un botánico alemán, Joachim Jung (1587-1657), quien vivió y enseñó en Hamburgo; el filósofo francés Pierre Gassendi (1592-1655), en su libro *Syntagma philosophicum* (1649), y Robert Boyle (1627-1691), a quien describe su epitafio irlandés como "el padre de la química y el tío del conde de Cork".

Gassendi. Jung se interesó únicamente por los aspectos botánicos del atomismo, de suerte que sus especulaciones no necesitan que nos ocupemos más de él; pero Gassendi aportó importante contribución al pensamiento físico. Imaginaba que toda materia estaba compuesta de átomos, los cuales eran absolutamente rígidos e indestructibles; eran similares en sustancia, pero variados en tamaño y forma, y se movían en todas direcciones a través del vacío de los espacios. Pensaba que muchas de las propiedades observadas en la materia podían atribuirse al movimiento de esos átomos, como hoy sabemos que es cierto. Dio también una explicación exacta a medias de los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso, tan acertada como las transiciones de uno a otro estado. Pero se desvió osadamente al suponer que el calor de un cuerpo resultaba de la presencia de un género especial de "átomo de calor".

Robert Boyle. Diez años después, Boyle se interesó por estas cuestiones y llegó a conclusiones que ayudaron a transformar la química desde un cúmulo de vagas especulaciones en una ciencia coherente y compacta.

Los escolásticos de la Edad Media habían sostenido la primitiva doctrina griega de que todas las sustancias eran mezclas de los cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego; al mismo tiempo que otros creyeron que la base de todo género de sustancia tenía que hallarse en los tres "principios" de los árabes: sal, azufre y mercurio. En general, se suponía que toda sustancia podía ser "resuelta", en sus elementos fundamentales o principios, por el fuego. Boyle no estuvo conforme con esto y otras muchas ideas análogas, y adujo hechos muy sencillos contra todo ello.

Señaló que algunas sustancias, como el oro y la plata, resistían por completo al fuego. Cuando se somete el oro al fuego, no elimina tierra, ni agua, ni aire; ni tampoco elimina sal, ni azufre, ni mercurio; continúa exactamente siendo oro. Incluso cuando el oro sufre cambio, como, por ejemplo, cuando le ataca el agua regia (mezcla de los ácidos nítrico y clorhídrico), conserva todavía su existencia y después puede recuperarse como oro. Lo mismo ocurre cuando el oro se alea con otros metales; no hay allí disminución ni transmutación de su sustancia y la aleación siempre puede tratarse de manera que devuelva exactamente la misma cantidad de oro que en ella había entrado. Esto indica, decía Boyle, que el oro tiene permanente e inalterable existencia.

A otras sustancias, naturalmente, las altera el fuego. En 1630, Jean Rey, físico belga, había probado[34] que el estaño y el plomo aumentan en peso cuando se les calcina. Boyle entonces repitió y confirmó los experimentos de éste, demostrando así que la calcinación era algo más que una mera resolución en sustancias más primitivas.

Armado únicamente de consideraciones tan sencillas como éstas, Boyle combatió la existencia de los cuatro elementos: tierra, aire, fuego y agua, y los tres principios de los árabes. En 1661 publicó un libro,[35] en el cual la concepción moderna de un elemento químico remplaza a los "elementos" y a los "prin-

cipios" que habían cerrado el paso al progreso de la química durante tan largo tiempo. Boyle explicó que él llamaba *elementos* a "ciertos cuerpos primordiales y simples, los cuales, al no estar constituidos por ningunos otros cuerpos ni por ningún otro único, son los ingredientes con los cuales todos los llamados cuerpos perfectamente mezclados están compuestos, y en los cuales en último lugar se resuelven". Pocos años después afirmó[36] que toda materia está hecha de partículas sólidas, cada una con su propia forma determinada: los átomos de la química moderna. Decía Boyle que éstos pueden combinarse unos con otros para formar los grupos característicos que ahora llamamos *moléculas.* Estas ideas podían haber encaminado bien el estudio de la química, pero tardaron mucho en conseguir general aceptación y sólo hicieron pequeños progresos hasta que el químico francés Lavoisier dio a conocer ideas semejantes nada menos que un siglo más tarde (p. 305).

Entretanto, Boyle emprendió un cierto número de experimentos sobre las propiedades físicas de los gases, con la colaboración de Robert Hooke, el muy capaz e ingenioso experimentador que había escogido por ayudante. Su trabajo habría sido imposible sin la bomba de aire que Otto de Guericke, burgomaestre de Magdeburgo, había inventado pocos años antes. Boyle y Hooke perfeccionaron este instrumento en 1656, y se pusieron a trabajar para estudiar el peso, compresibilidad y elasticidad del aire, como igualmente algunas otras de sus propiedades. Los primeros experimentos de Boyle con esta "nueva máquina neumática" inmediatamente revelaron lo que él llamaba *el resorte de aire*: cuando se comprimía el aire éste ejercía fuerza para recobrar su anterior volumen, exactamente igual que hace un muelle de acero arrollado. Medidas exactas a diferentes presiones condujeron a la ley, conocida a menudo como *ley de Boyle* (1661), la cual establece que si duplicamos la presión sobre un gas reducimos su volumen a la mitad, y así suce-

sivamente; el volumen varía en razón inversa de la presión. La idea de esta ley no parece haberse originado en Boyle, porque éste nos dice que le había sido sugerida por Richard Townley, y que "cierta persona" (probablemente Hooke), y también lord Brouncker, presidente de la Royal Society, ya habían hecho experimentos que confirmaron la ley. En 1676 el físico francés Mariotte repitió algunos de los experimentos de Boyle y anunció lo que era virtualmente la misma ley que Boyle había anunciado 15 años antes; se conoce usualmente como *ley de Boyle-Mariotte*.

En 1662, Boyle y Hooke, experimentando aún con la bomba de aire, encontraron que un animal no podía vivir, ni una sustancia podía arder, en un recipiente del cual se hubiera extraído la mayor parte del aire. Esto demostraba que el aire era igualmente necesario para la respiración y la combustión; pero Boyle halló que estos procesos consumían sólo una pequeña parte de aire. Cuando quedaba todavía gran cantidad de gas en el recipiente, un pequeño animal moría, o una llama se extinguía. Sacó la conclusión de que el aire no era una sustancia simple, sino una mezcla; uno de sus ingredientes podía mantener la respiración y la combustión, mientras que otro o los otros no servían para el caso. Lo que servía para esto lo describieron como el "principio activo" del aire *(spiritus nitro-æreus);* era clara y simplemente nuestro oxígeno, pero ellos no tuvieron medio alguno de aislarlo, y por tal causa no les fue posible estudiar sus propiedades.

En 1668, John Mayow (1640-1679), médico de Cornwall, sostuvo que el aumento de peso que un cuerpo experimentaba en la combustión debía resultar de su combinación con alguna "más activa y sutil parte del aire", a la cual llamó *spiritus igneo-æreus,* esto era también oxígeno, pero tampoco lo pudo estudiar en detalle. Borch separó el mismo gas del salitre en 1678; pero todavía sin comprender su naturaleza, y no empezó a com-

prenderse su importancia hasta que Priestley lo redescubrió en 1774 (p. 304).

MATEMÁTICAS

Hemos visto que las matemáticas permanecieron casi estancadas durante la mayor parte de la Edad Media. La geometría hizo muy pocos progresos desde que los alejandrinos explotaron el venero que habían descubierto tan brillantemente los griegos de Jonia; se necesitaban nuevos métodos para que pudiera continuar el progreso, y éstos los aportaron en su debido tiempo por los métodos analíticos que describiremos más adelante (p. 255). La trigonometría se consideraba aún como un mero instrumento de la astronomía, y también quedó largo tiempo estancada. El álgebra y la aritmética habían conseguido algunos progresos, la mayor parte en el siglo XVI, si bien consistieron principalmente en perfeccionamiento de la notación y de los métodos de cálculo, siendo el ejemplo más sobresaliente la invención de los logaritmos.

En el siglo XVII hubo un avance en todo el frente, acompañado de un cambio en el tipo de matemáticas estudiadas. En resumen, nacieron las matemáticas aplicadas y las matemáticas puras pasaron a segundo término. Los griegos habían estudiado las matemáticas en muy gran parte como ejercicio mental, casi a la manera de resolver un rompecabezas. Deseaban mayor conocimiento, porque lo encontraban intensamente interesante en sí mismo, e incluso aún más en el procedimiento de adquirirlo y sistematizarlo, pero no se les ocurrió apenas desarrollar el tema en vista de su utilidad práctica, y lo mismo ocurrió a lo largo de toda la Edad Media. En el siglo XVII sobrevino un gran cambio cuando se vio que los resultados de los experimentos o

de la observación podían necesitar matemática de tipo práctico para su adecuado estudio.

El estudio de las secciones cónicas proporcionó un ejemplo preciso. Menecmo y Apolonio las habían estudiado por el interés intelectual que provocaban y sin pensar gran cosa en ninguna aplicación práctica. La situación cambió de manera caleidoscópica cuando Kepler descubrió que los planetas se movían describiendo secciones cónicas. El estudio de estas curvas asumió nueva importancia, y los *Principia* de Newton lo elevaron a un plano todavía superior. Precisamente por aquel tiempo se hicieron de uso general los métodos de la geometría analítica, y cualquier matemático tolerablemente competente podía entonces resolver por métodos rutinarios los problemas que antes habrían exigido en todos los aspectos la habilidad de un gran matemático.[37]

Las matemáticas puras se estudiaban aún por razón de sí mismas y por la fascinación que ejercían sus métodos. Se investigaba sobre problemas que no tenían en modo alguno aplicaciones prácticas, y es de presumir que ningún valor aparte de la satisfacción que originaban en quienes los descubrían y en quienes los contemplaban. Ejemplo característico de esto fue el teorema de Fermat de que no se pueden hallar números enteros $x, y, z,$ tales que respondan a $x^3 + y^3 = z^3$, y que la misma cosa es verdad para todas las potencias superiores al cubo, teorema que Fermat había planteado sin pruebas, y para el cual no se ha encontrado prueba en favor ni en contra. Otro ejemplo de época posterior es el teorema de que todo número par puede expresarse como la suma de dos números primos; a pesar de haber dedicado gran empeño en demostrar este teorema, no se ha encontrado aún la demostración en favor o en contra.

Pero estos triunfos de las matemáticas abstractas eran en su mayor parte de la naturaleza de pasatiempos, y los matemáticos dedicaron su atención principalmente a investigaciones que se

necesitaran urgentemente para usos prácticos, o que prometieran ser de uso práctico, y de aquí resultó que las matemáticas del siglo XVII diferían de todas las manejadas en los siglos precedentes. Su objeto principal fue la aplicación de las matemáticas a los fenómenos de la naturaleza; sus más importantes realizaciones fueron el desarrollo de la geometría analítica y la introducción del cálculo infinitesimal, el cual, en sus dos formas de cálculo diferencial y cálculo integral, hizo a la matemática especialmente adecuada para la investigación de los fenómenos naturales.

Geometría analítica

El descubrimiento de la geometría analítica se atribuye corrientemente a Descartes (1596-1650) y a Fermat (1601-1665), pero fue seguramente conocido y utilizado antes de este tiempo, y posiblemente incluso por Apolonio.

Tras de haber dimitido Descartes su comisión para disponer de más tiempo que dedicar a las matemáticas y a la filosofía, escribió en primer lugar *El mundo,* que no publicó (p. 209), y después el más famoso de sus libros, *Discurso del método,* publicado en 1637. Era este libro principalmente filosófico; pero Descartes añadió a él, en el año siguiente, tres apéndices científicos, siendo el tercero de aquéllos la *Geometría,* en el cual explicaba los principios de la geometría analítica. Este es el libro que Newton leyó en Cambridge y el que le ayudó a despertar su interés por las matemáticas. Es difícil de leer y su estilo es oscuro. Decía Descartes que así lo hizo intencionalmente, temiendo que ciertos sabihondos se vieran tentados a decir que aquello ya lo sabían de siempre. Afortunadamente, John Wallis (1616-1703), matemático de Cambridge que había llegado a ser profesor de Oxford, publicó en 1665 un tratado sobre las secciones cónicas, en el cual explicaba toda la materia con suma claridad.

Otro gran matemático francés, Pierre de Fermat (1601-1665), se interesó también en la materia, y parece que descubrió los métodos generales de la geometría analítica independientemente de Descartes. Mas, habiendo permanecido su obra inédita hasta después de su muerte, el crédito pertenece en primer lugar a Descartes.

Los principios generales del método son fáciles de comprender. Las varias propiedades de la circunferencia, tal como Euclides las enumeró, parecen en principio propiedades separadas e independientes (como el tamaño de los zapatos de un individuo y su gabán); pero no lo son. La mayor parte de ellas no son verdaderas para ninguna curva, excepto la circunferencia, de suerte que cualesquiera de ellas forma una especie de definición o descripción completa de la circunferencia y, por lo tanto, contiene todas las propiedades de la circunferencia que le son inherentes.

Podemos describir la circunferencia como una curva en la cual todos sus puntos se hallan a la misma distancia de otro punto que llamamos *centro*. Ésta es la definición de Euclides, y todas las propiedades de la circunferencia están incluidas en ella, como demuestra Euclides. Pero podemos definir también la circunferencia como una curva de tal naturaleza que una línea fija *AB* subtiende el mismo ángulo en todos los puntos de la curva; esto es: que si marchamos por la circunferencia, la línea *AB* nos aparece siempre con la misma longitud (el ángulo *ACB* de la figura VI.6. permanece siempre el mismo).[38] Parece, a primera vista, que esto tiene poca relación con la definición de Euclides y, no obstante, puede demostrarse que las dos definiciones implican exactamente las mismas propiedades; son lógicamente equivalentes. Mas el método de la geometría analítica es dar una definición todavía de otro género, la cual puede denominarse definición algebraica y deducir tantas propiedades

de la curva como queramos de aquella definición por medio de procedimientos puramente algebraicos.

Podemos imaginar una superficie plana dividida en cuadrados (fig. VI.5.), a la manera como puede hacerse un mapa de una comarca con líneas paralelas de longitud y de latitud, y entonces es posible especificar la posición de un punto *C,* en la superficie, diciendo que se encuentra a x unidades de longitud a la derecha de un punto *O,* y a y unidades de longitud sobre una línea horizontal que pasa por el punto *O.* Y, si *OX* y *OY* son perpendiculares en el punto *O,* podemos decir que el punto *C* está a una distancia x sobre la línea *OX,* y a una distancia y sobre la línea *OY.* Los valores de x y de y se llaman las *coordenadas* del punto *C.*

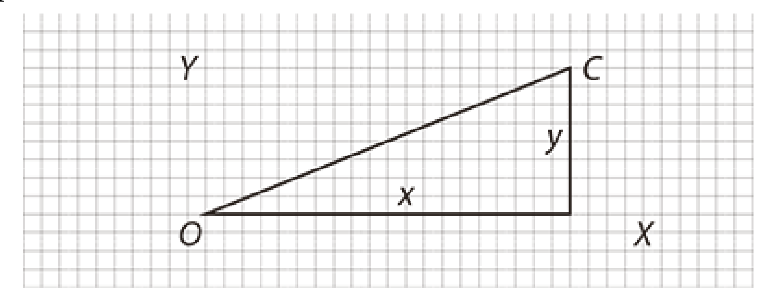


FIGURA VI.5.

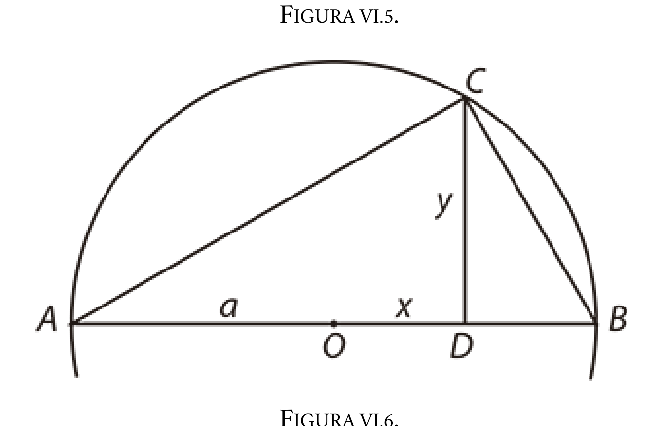


FIGURA VI.6.

Pero el teorema de Pitágoras nos dice que $OC^2 = x^2 + y^2$. Por consiguiente, si se traza una circunferencia de radio a alrededor de *O* como centro, entonces *C* estará en la circunferencia si

$x^2 + y^2 = a^2$, pero no en cualquier otro caso. De esta suerte, esta relación es verdadera para las coordenadas de todos los puntos de la circunferencia y no lo es para cualquier otro punto; ella significa una especificación algebraica de la circunferencia, y todas las propiedades de ésta le son inherentes. Nosotros la llamamos *ecuación* de la circunferencia.

Habríamos obtenido precisamente la misma relación definiendo la circunferencia de otra manera; por ejemplo, como una curva tal, que una recta fija *AB* subtiende un ángulo recto en cada punto de la curva (fig. VI.6.). Porque, sea *AB* de longitud igual a $2a$, y sea *O* su punto medio; bajemos una perpendicular, desde un punto *C* de la circunferencia, sobre *AB*, siendo *D* el pie de esta perpendicular; sea $OD = x$ y $DC = y$. Entonces el ángulo *ACB* será recto, y el teorema de Pitágoras nos dice que:

$$AB^2 = AC^2 + CB^2 = (AD^2 + DC^2) + (DC^2 + DB^2) =$$

$$= (a + x)^2 + 2y^2 + (a - x)^2 = 2(a^2 + x^2 + y^2).$$

Siendo AB^2 igual a $4a^2$, la ecuación se transforma en $x^2 + y^2 = a^2$, que es la misma relación obtenida anteriormente.

Cualquiera que fuere la definición geométrica que aceptemos para la circunferencia, siempre llegaremos a la misma descripción algebraica. Verdaderamente así debía ser o, de lo contrario, la misma curva tendría dos inconsistentes series de propiedades. Y, por el procedimiento inverso, de igual manera que esta descripción puede derivarse de cualquier única propiedad de la circunferencia, inversamente, todas y cada una de las propiedades de la circunferencia se pueden deducir de aquella descripción por simples procedimientos algebraicos.

De igual manera, cualquier otra curva puede tener todas sus propiedades resumidas en una sola ecuación de género análogo, formando esta ecuación una especie de compendio de las propiedades de la curva, que pudieran ser, en número, de va-

rios centenares. Podemos deducir todas las propiedades de la curva, o tantas como queramos, de aquella ecuación única.

Tales son los métodos de la geometría analítica. Son incomparablemente más poderosos, más concisos y más penetrantes que los métodos de tanteo de la vieja geometría griega, de tal manera que esta vieja geometría es ahora, poco más que una pieza de museo.

El cálculo infinitesimal

La otra creación principal de las matemáticas del siglo XVII fue lo que hoy llamamos *cálculo infinitesimal.* Pudiera describirse como un método de aplicación de las matemáticas a los cambios continuos, tal como ocurren en la naturaleza, más que a las condiciones simplificadas e irreales que muy a menudo imaginan los matemáticos. El cálculo toma muchas formas, pero puede explicarse su esencia íntima mediante un problema muy sencillo: hallar el valor del área limitada por una línea curva.

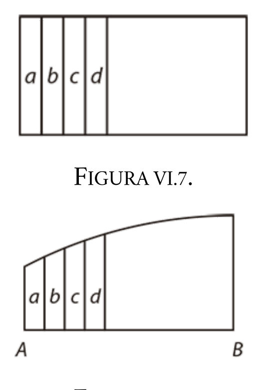


FIGURA VI.7.

FIGURA VI.8.

El área de un rectángulo de altura *h* y base *l* se sabe que es, naturalmente, *hl,* el producto de la base por la altura. Pero podemos considerar, asimismo, esta área como la suma de un número de fajas *a, b, c, d,...* como en la figura VI.7. Si cada faja tiene una anchura *w,* su área es *hw,* y la suma de todas ellas es el total del área requerida.

Esto es muy sencillo; pero supongamos ahora que la superficie no está limitada por un borde superior recto, como en la figura VI.7., sino por un límite superior curvo, como en la figura VI.8. Las fajas de área *hw* del rectángulo son ahora diferentes, porque las alturas son diferentes; a medida que se recorre el área desde *A* hasta *B*, cambia *h* continuamente. Sean h_a, h_b, h_c,… las alturas de las fajas *a, b, c,*… El total del área que buscamos será entonces $h_a w + h_b w + h_c w + h_d w + \ldots$

Existe, sin embargo, una ambigüedad en la medida de las alturas de las fajas, y obtendríamos diferentes resultados si pensáramos en tomar como alturas de las fajas, en la figura VI.9., *AP, A′P′* y *A″P″*. Evidentemente, el único modo de conseguir un seguro y exacto resultado es disponer que las alturas *AP, A′P′, A″P″* fueran las mismas, y esto podemos conseguirlo haciendo la faja de anchura infinitesimal. El área que entonces necesitamos hallar es la suma de infinito número de fajas, cada una teniendo cero por área. Este sencillo ejemplo contiene en sí la esencia del cálculo infinitesimal.

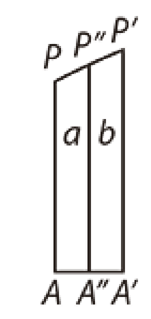


FIGURA VI.9.

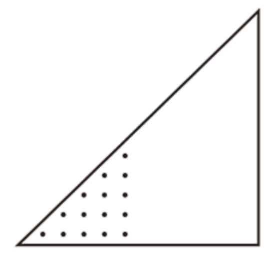


FIGURA VI.10.

El método apareció por vez primera en el siglo XVII, y se conoció como el *método de indivisibles,* entendiendo por la palabra indivisibles: "demasiado pequeño para ser dividido". Kepler había empleado este método en forma algo primitiva, tan lejos como el año 1604, pero lo estableció con claridad por vez primera el matemático italiano Bonaventura Cavalieri (1598-1647) en un libro que escribió en 1629 y publicó en 1635. Cavalieri consideraba el área como formada por un número de pequeñísimos rectángulos o "puntos", los cuales eran todos iguales y de tamaño infinitesimal. Una columna de estos puntos formaba una faja como las que hemos considerado anteriormente. Si quería hallar el área del triángulo representado en la figura VI.10., lo consideraba como la suma de las fajas que contenían, respectivamente, 1, 2, 3,… puntos. El total del área de un triángulo de n fajas será $1 + 2 + 3 +… + n$ puntos. Cavalieri sabía que la suma de esta serie de números es $^1/_2n^2 + {}^1/_2n$. El primer término $^1/_2n^2$ de esta suma es n veces el segundo término, de suerte que, como n es un número muy grande, excede enormemente al segundo, y la suma puede tomarse, sin error estimable, igual a $^1/_2n^2$. Por consiguiente, el área del triángulo es la de $^1/_2n^2$ puntos, que es equivalente a la fórmula ordinaria: $^1/_2$ de base × altura.

En este ejemplo especial no conduce el método a ningún nuevo resultado, pero sí en otros casos. Supongamos que el área no es la de un triángulo limitado por una línea recta, como en la figura VI.10., sino de una superficie limitada por una parábola, siendo la ecuación de la parábola $y = x^2$. Entonces las fajas *a, b, c,...* hay que suponer que consisten en 1^2, 2^2, 3^3, … puntos, y el área entera es:

$$1^2 + 2^2 + 3^2 +… + n^2$$

puntos. Pero la suma de esta serie es $\frac{1}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 + \frac{1}{6}n$, en la cual, el primer término es infinitamente más grande que los que lo siguen. Por consiguiente, puede aceptarse el área total como $\frac{1}{3}n^3$ puntos, lo cual se ve inmediatamente que es $\frac{1}{3}$ de la base por la altura.

John Wallis presentó este último ejemplo en su *Arithmetica infinitorum* (1665), y demostró, además, que la superficie limitada por una curva que tiene una ecuación de la forma $y = xm$, en la que m es un número entero, es $\frac{1}{m+1}$ veces el producto de la base por la altura. Wallis estudió algunos casos especiales y luego extendió el método a las curvas que tienen ecuaciones de la forma $y = (1 - x^2)^m$, en la que m es número entero, y el valor de y es:

$$y = a + bx + cx^2 + ex^3 + \ldots$$

En el último caso se halla que el área es:

$$x(a + \frac{1}{2}bx + \frac{1}{3}cx^2 + \frac{1}{4}ex^4 + \ldots).$$[39]

Cuando Wallis trató de extender sus resultados a problemas más complicados, se vio apurado. Le hubiera gustado hallar el área del círculo con el radio como unidad, cuya ecuación es $y = \sqrt{(1 - x)^2}$, o $y = (1 - x^2)^{1/2}$, pero no supo cómo “desarrollar” esto en serie en la forma tipo $y = a + bx + \ldots$

Desde este punto en adelante, la mayor parte del progreso fue hecho en primer lugar por Newton, aunque demoró tanto la publicación de sus resultados que otros inevitablemente acapararon gran parte de su crédito. Cuando leyó la obra de Wallis en el invierno de 1664-1665, vio la importancia que tenía el descubrimiento del desarrollo de $(1 - x^2)^{1/2}$. Se puso a la obra, y no solamente lo descubrió, sino también el desarrollo más general de $(1 - x^2)^m$, donde m es una cantidad entera o fraccionaria, positiva o negativa (el desarrollo que se conoce corrientemente como el *teorema del binomio* o *binomio de Newton*). Hemos

visto (p. 216) cómo Newton nos refiere que obtuvo aquel desarrollo durante los dos años de peste de 1665 y 1666, "cuando estaba en la flor de su edad para inventar", y "pensaba en matemáticas y filosofía más que en ningún otro tiempo desde aquél". No obstante, no lo publicó hasta 1704, cuando salió a luz pública un apéndice de *Óptica* titulado *De quadratura curvarum.* Por tanto, el teorema del binomio se dio por vez primera al mundo aproximadamente 40 años después de su descubrimiento.

La segunda parte de este rezagado apéndice era aún más importante que la primera, porque en ella explicaba el más útil de todos los descubrimientos matemáticos de Newton, el cálculo diferencial, al cual llamó *método de fluxiones*. Había comenzado a tratar de éste en un manuscrito fechado en 1665.

Imaginaba Newton que una cantidad x, que él llamaba *fluente,* la cantidad cambiante, varía su valor continuamente a medida que pasa el tiempo. Describe la cuantía de la cantidad en que varía como la *fluxión,* que designaremos como x (Newton usó la x con un punto encima). Él quería determinar la relación entre la fluente y su fluxión en términos matemáticos precisos.

Supongamos, por ejemplo, que la fluente x varía de tal manera que después de un cierto número de segundos t transcurridos, su valor es siempre at^2, para cualquier valor de t: ley que encontró Galileo para una esfera rodando por un plano inclinado. Newton, primeramente, dividió el tiempo t, en el cual tiene lugar la variación, en infinito número de momentos, cada uno de ellos de duración infinitamente pequeña, o, e imaginó que después de un tiempo t transcurre otro momento de duración o. Durante este intervalo, x aumenta en ox y por tanto varía hasta $at^2 + ox$. Pero como ha transcurrido un tiempo total $t + o$, el nuevo valor de x debe ser $a(t + o)^2$, esto es:

$$at^2 + 2ato + ao^2$$

Puesto que este valor debe ser el mismo que $at^2 + ox$, el valor de x tiene que ser $2at + ao$. El último término, ao es infinitamente pequeño, y, por tanto, se puede "eliminar", y quedamos con $2at$ como la fluxión de at^2. Si un cuerpo cae recorriendo una distancia at^2 en t segundos, entonces su velocidad de caída debe ser $2at$.

En otro tipo de problema se da la fluxión y se desea encontrar la fluente. Por ejemplo, se ha encontrado, como resultado de observación, que la velocidad de un cuerpo en su caída libre a través del espacio experimenta una aceleración por segundo de 32 pies (algo más de 9.5 metros). Después de t segundos, la velocidad de su caída será $32t$ pies por segundo. Por consiguiente, si el cuerpo ha recorrido y pies en su caída, $32t$ será la fluxión de y. Acabamos de ver que $2at$ es la fluxión de at^2; por lo tanto, $32t$ debe ser la fluxión de $16t^2$, lo cual significa que después de que un cuerpo ha caído durante t segundos habría recorrido en su caída la distancia de $16t^2$ pies.

Supongamos que este mismo objeto marcha proyectado horizontalmente con una velocidad v en el momento exacto en que empezaba su caída. Si despreciamos la resistencia del aire, esta velocidad horizontal persistirá sin alteración durante la caída, y, por consiguiente, durante t segundos de caída, el proyectil recorrerá una distancia horizontal x igual a vt. Entonces, podemos sustituir t por x/v, y veremos que el valor de y es: $y = 16x^2/v^2$. Esta relación entre x e y es, naturalmente, la ecuación de la trayectoria del proyectil, que representa una parábola. Vemos de este modo cómo se puede emplear el cálculo para investigar el movimiento de un cuerpo, en tanto que la geometría analítica se utiliza para interpretar los resultados.

Estos sencillos ejemplos habrán dado alguna ligera idea de cómo estas dos nuevas ramas de las matemáticas abrieron el camino para el estudio exacto de los fenómenos de la naturale-

za. No hay duda alguna de que los diferentes problemas podrían resolverse con frecuencia por otros métodos: en realidad, los que acabamos de presentar fueron resueltos por primera vez por Galileo utilizando otros métodos. Pero otras soluciones dependían del ingenio o de que la suerte deparara el procedimiento adecuado, en tanto que el método de las fluxiones reducía cada problema a una cuestión de rutina. No todos los problemas admiten solución de este modo; pero es muy fácil ver si un problema es soluble, y si lo es, hallar su solución.

Si Newton hubiera publicado su descubrimiento inmediatamente que lo hizo, habría sido muy grande su valor para la ciencia. Es verdad que redactó un bosquejo en 1669, que entregó a Barrow, y probablemente a cierto número de amigos y de discípulos, pero no procedió a publicarlo, en el significado corriente de esta palabra. En junio y octubre de 1676 (10 años después de su invención del método) lo encontramos escribiendo dos cartas a su contemporáneo Leibniz explicándole lo que había hecho. No le fue posible referirse a ninguna cosa publicada, y ocultó su realización en el ininteligible cifrado siguiente:

6a cc d æ 1 3*e ff* 7i 3*l* 9*n* 4*o* 4*q rr* 4*s* 9*t* 12*v x,*[40]

después de lo cual no hizo nada hasta 1704, cuando la sustancia del tema fue publicada en el apéndice a la *Óptica.* En 1711 apareció por vez primera una descripción completa del método.

En aquel tiempo estaba clamando el progreso de la ciencia precisamente por algún método como éste que había descubierto Newton, en tanto que la obra de Cavalieri, Wallis y otros varios marchaba justamente en la dirección de este descubrimiento. De esta suerte corrió Newton grave riesgo de que alguno duplicara su descubrimiento y lo publicara antes que él. Y alguno lo hizo ciertamente, en la persona de Leibniz.

Leibniz (1646-1716). Gottfried Wilhelm Leibniz nació y fue educado en Leipzig; antes de llegar a la edad de 20 años estudió matemáticas, filosofía, teología y derecho. Después de haber servido por algún tiempo al elector de Mainz, ingresó en el cuerpo diplomático; más tarde pasó a servir a la familia Brunswick, y en el año de 1676 se le nombró bibliotecario del duque de Hannover, cargo cuyas obligaciones le dejaban amplitud de tiempo libre para dedicarse a continuar su estudio favorito de filosofía y matemáticas. En el año de 1682, conjuntamente con Otto Mencke, fundó un periódico titulado *Acta Eruditorum,* el único periódico científico de propiedad privada que hubo en Europa en aquel tiempo.

En el número de octubre de 1684 de este periódico dio comienzo a la publicación de una serie de documentos en los cuales desarrollaba un cálculo infinitesimal que era sustancialmente idéntico al de Newton, pero que estaba expresado en forma más sencilla y más conveniente. Su notación era la misma que hoy usamos y con seguridad superior a la de Newton. Donde Newton había escrito *ox* para designar el incremento de *x,* Leibniz escribía $(dx/dt)dt$, o, más sencillamente, dx. Leibniz abrevió al mismo tiempo el pensamiento y la escritura descartando la idea de que las variaciones tienen que suceder en el tiempo. Y como Leibniz empezara a publicar su desarrollo de este tema en 1684, en tanto que Newton no lo dio a luz hasta 1704, Leibniz se llevó la mayor de la fama a los ojos del mundo, y justamente desde cierto punto de vista, puesto que el cálculo habría sido tan exactamente útil al mundo si Newton no lo hubiera descubierto jamás. La situación, que debió de ser muy amarga para Newton, llevó a una larga y agria controversia, primero entre Newton y Leibniz, y luego, hasta la muerte de ambos y, aun después, entre sus partidarios. Ninguna de ambas partes discutió que los métodos de Leibniz y de Newton eran sustancialmente los mismos; ninguna de ambas partes discutió que

Newton hubiera sido el primero en descubrir el método, ni que Leibniz hubiera sido el primero en publicarlo; el único punto en discusión era si Leibniz, a pesar de sus muchas protestas en contrario, había o no tomado alguna idea, o todas, por haber visto ciertos manuscritos de Newton. Puede pensarse que hubiera podido suceder así, porque mientras estuvo en Londres, un manuscrito de Newton estaba en poder de la Royal Society, y pudieron habérselo enseñado a Leibniz. Por fortuna, esta contienda no tuvo influencia apreciable en el progreso de la ciencia, y, por tanto, no interesa al presente libro.

Leibniz escribió otros varios documentos matemáticos, la mayor parte en el *Acta eruditorum;* pero, aparte de los que trataban del cálculo infinitesimal, ninguno fue de primera importancia. Muchos de aquéllos contenían torpes errores; mas, por lo menos, familiarizaron a los matemáticos de Europa con los métodos del cálculo infinitesimal. El mismo efecto produjeron los escritos de los dos hermanos Bernouilli, Jakob Bernouilli (1654-1705), que nació, vivió y murió en Basilea, en cuya universidad fue profesor de matemáticas, y su hermano Johannes (1667-1748), quien le sucedió en la cátedra después de su muerte.

VII
LOS DOS SIGLOS SIGUIENTES AL DE NEWTON
(1701-1897)

Nos acercamos ahora a una época que, si no tan asombrosamente brillante como su gran predecesora, fue, al menos, de sólido y constante progreso. No produjo ningún segundo Newton; pero proporcionó abundantes investigadores de primer orden. El aficionado estudioso y de talento podía incluso realizar trabajo científico de alto valor, porque una mentalidad sencilla podía llevar adelante una buena obra en el conocimiento de una parte esencial de la ciencia: los días de inmensas acumulaciones de bibliografía y de equipos de expertos, cada uno entendiendo únicamente un ángulo del objeto de investigación, aún no habían llegado. Sin embargo, estaban ya en camino, porque se había comenzado la tendencia de unificar las varias ciencias en una ciencia única, perdiendo su identidad como unidades separadas, y fundiéndose en un simple campo de conocimiento que sería demasiado vasto para que cualquier individuo abarcara el conjunto, ni incluso una gran parte. Es de notar la aparición de palabras como *termodinámica, astrofísica* y *electroquímica*.

Mecánica

En la historia del progreso sobresale, en el siglo XVIII, el estudio de la mecánica. Galileo y Newton habían abierto el camino, pero aún quedaba gran porción de trabajo que hacer para ampliar los avances alcanzados y llenar lagunas. Las leyes de Newton sobre el movimiento sólo eran aplicables a partículas, esto

es, a trozos de materia suficientemente pequeños para que se les tratara como puntos y que de este modo tuvieran posiciones definidas, velocidades y aceleraciones que pudieran atribuírseles sin ambigüedad. Naturalmente que todo cuerpo estaba formado de partículas, de suerte que es posible, en principio, deducir su movimiento de las leyes de Newton; pero el paso del principio general a la solución de un problema particular puede ser largo y difícil. Había necesidad evidente de hallar métodos generales para dar este paso, y el problema que ello implica atrajo la atención de los más grandes matemáticos de la época.

El problema asume su forma más sencilla cuando el cuerpo en cuestión es "rígido", esto es, cuando la distancia entre cada dos de sus partículas es inalterable, de manera que el cuerpo no puede cambiar su forma. Hemos visto cómo los valores de tres coordenadas fijan la posición de cualquier punto determinado en un cuerpo rígido (por ejemplo, su centro, si lo tiene). Tres magnitudes más se necesitan para fijar la orientación del cuerpo en el espacio y éstas serán generalmente ángulos o de la naturaleza general de los ángulos. Conociendo los valores de estas seis cantidades podemos deducir la posición de cada partícula del cuerpo rígido y, si las variaciones de estas seis cantidades pueden determinarse, podemos seguir el movimiento total del cuerpo. Las seis cantidades mencionadas pueden designarse como las *coordenadas generalizadas* del cuerpo, y las reglas para seguir sus variaciones fueron determinadas por Euler.

Leonard Euler (1707-1783) fue uno de los grandes matemáticos de este periodo. Hijo de un pastor luterano de Basilea, vivió sucesivamente en Basilea, San Petersburgo y Berlín, adonde se trasladó a invitación de Federico el Grande, y posteriormente regresó a San Petersburgo, donde se quedó completamente ciego y murió en 1783. De las leyes de Newton sobre el movimiento de una partícula dedujo leyes generales del movimiento de un cuerpo rígido, y éstas dieron explicaciones satisfactorias

de los movimientos de giróscopos, de trompos o peonzas, del vuelo de una pelota de golf, de los movimientos de precesión (p. 112) y de nutación (p. 280) de la Tierra, y de una variedad de movimientos similares.

Lagrange (1736-1813). Aún hizo mayores progresos otro protegido de Federico, Joseph Louis Lagrange, que fue probablemente el más grande de todos los matemáticos de esta época. Nació en Turín, pero se trasladó a Berlín a la edad de 30 años a consecuencia de haber expresado Federico el deseo de que "el más grande matemático de Europa residiera en la corte del rey más grande de Europa". Cuando Federico murió, en 1787, Lagrange recibió invitaciones de España, Nápoles y Francia para emigrar a sus capitales. Aceptó la última de ellas, y vivió a gran tren en el Louvre, aunque sufriendo continuamente de poca salud y viéndose atacado de profunda melancolía. Entonces vino la revolución y alteró su considerable situación. No obstante, permaneció en París como profesor, primero de la Escuela Normal y después de la Escuela Politécnica, hasta su muerte. Fue presidente de la comisión que el gobierno francés designó en 1799 para reformar su sistema de pesas y medidas, y en gran parte se debió a sus esfuerzos que el sistema decimal de pesas y medidas, con el metro y el gramo como unidades, se estableciera en Francia, desde donde, naturalmente, se extendió rápidamente por todo el continente europeo.

Euler había mostrado la manera de transformar las leyes de Newton de manera que pudieran aplicarse al movimiento de cualquier cuerpo rígido. Lagrange las transformó de manera que pudieran aplicarse al sistema más general de cuerpos imaginable. En este caso, naturalmente, las variaciones en las seis coordenadas generalizadas no son bastantes para contarnos toda la historia del sistema. Mas, por complicado que pueda ser el sistema, su configuración puede siempre describirse mediante un número suficiente de coordenadas generalizadas, y las va-

riaciones de estas coordenadas nos dirán todo lo que afecta a su movimiento. Lagrange demostró cómo se podía alcanzar este conocimiento mediante métodos puramente rutinarios.

Esto significaba un gran avance, pero él continuó aún más lejos, en una dirección que ahora debemos describir en detalle.

Mínima acción. Herón de Alejandría había enseñado (p. 100) que un rayo de luz sigue siempre una trayectoria de longitud mínima, y esto es verdad incluso si el rayo es reflejado por uno o más espejos. Como la luz se propaga siempre con la misma velocidad en el aire, un trayecto de longitud mínima es también un trayecto de tiempo mínimo.

Después de que Snell (p. 234) hubiera descubierto la verdadera ley de refracción, Fermat (p. 255) demostró que la luz refractada se adaptaba a ese mismo principio del tiempo mínimo, teniendo en cuenta que la velocidad de la luz dependía de la sustancia a través de la cual se propagaba, de una manera que hoy se sabe que es la verdadera. Aceptando esto, puede demostrarse que el tiempo total invertido en cualquier propagación es también un mínimo. Podremos comprender la inclinación de un rayo de luz por la refracción, si pensamos que el rayo está sacrificando algo para acortar el camino de propagación, de suerte que pueda hacer mayor parte de su trayecto en el aire, en el cual se mueve más rápidamente. Por ejemplo, la luz que pasa a través de un prisma se inclina apartándose del vértice, asegurando de este modo que una mayor parte de su trayecto será hecha a través del aire, así como la luz que se propaga a través de una lente convexa se inclina como el rayo de la figura VII.1., evitando la parte gruesa de la lente como si fuera para propagarse más a través del aire; cuando se propaga a través de una lente cóncava, se inclina hacia la parte delgada de la lente, porque esto demora su avance menos que la parte gruesa, a través de la cual la propagación es más lenta. Por consecuencia, una

lente convexa hace converger a un haz de luz, mientras que una lente cóncava la hace divergir.

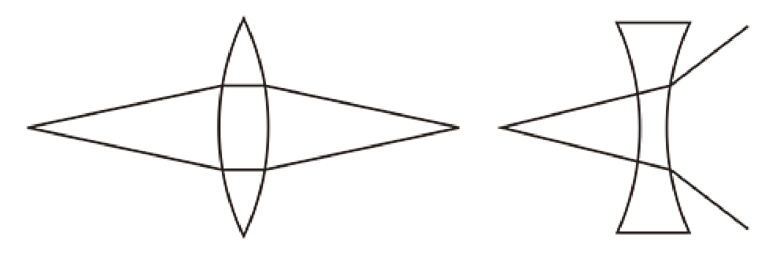


FIGURA VII.1.

Un siglo después de Fermat, P. L. M. de Maupertuis (1698-1759) supuso que todos los movimientos naturales deben de estar de acuerdo en algún principio análogo.[1] Sus razones eran teológicas y metafísicas más que científicas; pensaba que la perfección del universo exigía cierta economía en la naturaleza, que se opondría a cualquier gasto innecesario de actividad, de manera que los movimientos naturales deben de ser tales que hagan de cualquier cantidad de ellos un mínimo; era esto un género de principio general que hubiera llamado gran atención a la mentalidad griega; fue fructífero.

La principal dificultad estribaba en hallar la cantidad en cuestión. Ésta ya no podía ser el tiempo, puesto que para hacer de éste un mínimo, todos los objetos se habrían lanzado a través del espacio a la máxima velocidad de que fueran capaces (y éste no era claramente el modo de actuar de la naturaleza). Maupertuis introdujo una cantidad que llamó la *acción* de un movimiento. Era ésta el tiempo del movimiento multiplicado por el valor medio de *vis viva* durante todo este tiempo,[2] y pensó que aquella cantidad debía asumir su valor mínimo cuando los cuerpos se movían en su manera natural. Llamó a esto el principio de la acción mínima. A Euler le había impresionado la idea favorablemente, y había antepuesto argumentos en su defensa. Lagrange expuso después una prueba positiva de que la acción sería un mínimo si los objetos se movían como si fue-

ran dirigidos por la mecánica newtoniana; en otras palabras, el principio de la acción mínima se presentaba como una sencilla transformación de las leyes de Newton sobre el movimiento. Es digno de notar que el nuevo principio no contenía ninguna referencia explícita a coordenadas generalizadas; éstas habían servido de útil andamiaje para establecer el principio, pero se apartaron antes de que el principio se enunciara en su forma final.

Este principio redujo todo problema de dinámica a un problema de álgebra, exactamente igual que la geometría analítica había reducido todo problema de geometría también a uno de álgebra. Lagrange publicó la prueba de su principio en su *Mecánica analítica* (1788), y escribió en el prólogo:

> Tenemos ya varios tratados de mecánica; pero el plan de éste es enteramente nuevo. Trato de reducir esta ciencia, y el arte de resolver sus problemas, a fórmulas generales, cuyo simple desarrollo proporciona todas las ecuaciones necesitadas para la solución de cualquier problema [...] Los métodos que yo explico no requieren construcción geométrica ni mecánica, ni razonamiento, sino únicamente operaciones algebraicas.

De esta manera, las leyes de la propagación de la luz y las leyes del movimiento de los cuerpos materiales se presentaban como similares en forma; en cada caso, cada magnitud particular asumía su valor mínimo. Esta semejanza en la forma explica por qué algunos procesos mecánicos nos recuerdan otros procesos ópticos; por ejemplo, el bote de una pelota de tenis nos recuerda el reflejo de un rayo de luz, y la trayectoria curva, por la acción de la gravedad, es análoga a la trayectoria curva de un rayo de luz en la atmósfera terrestre. Esta analogía no fue del todo útil a la ciencia, puesto que, posteriormente, indujo a los físicos del siglo XIX a imaginar que la propagación de la luz podía explicarse por medio de las leyes de Newton, y ahora sabemos que no ocurre así.

HAMILTON. En el año de 1834, la fórmula de Lagrange fue transformada aún más por sir William Rowan Hamilton (1805-

1865), hijo de padres escoceses que vivían en Dublín, el cual fue elegido profesor de astronomía en el Trinity College de Dublín, a la edad de 22 años, cuando aún no estaba graduado. Puso la fórmula de Lagrange en la forma conocida como *ecuaciones canónicas,* en la cual se parecen de cerca a las ecuaciones originales de Newton, pero con la diferencia de máxima importancia de que no opera con las nociones de partículas infinitesimales, sino con las variaciones en coordenadas generalizadas. Las leyes de Newton decían que la magnitud de la variación del *momento* (de una partícula) era igual a la fuerza; las leyes de Hamilton nos dicen ahora que la magnitud de la variación de una cantidad, llamada el *momento generalizado,* es igual a otra cantidad llamada *fuerza generalizada.* En el caso más sencillo de una partícula sobre la que actúan fuerzas, las leyes de Hamilton se reducen exactamente a leyes newtonianas; en general, las leyes de Hamilton son adecuadas para aplicarlas a los más complicados sistemas de cuerpos imaginables.

Astronomía dinámica

La primera ciencia que se benefició de todo aquello fue más bien la astronomía, y el principal bienhechor fue Laplace, el gran contemporáneo de Lagrange, que ha sido denominado el Newton francés.

Laplace (1749-1827). Pierre Simon Laplace nació en Normandía el 23 de marzo de 1749, hijo de un campesino. Algunos bondadosos vecinos pagaron su educación en una escuela en la cual se negó a ser posteriormente el conserje. Más tarde fue a París y escribió una carta sobre los principios de mecánica a D'Alembert, el cual quedó tan impresionado con ella que consiguió para Laplace una plaza en la Escuela Militar a la temprana edad de 20 años. Dieciséis años después (1785) le tocó a Lapla-

ce examinar de matemáticas al joven cadete Napoleón Bonaparte.

Su nombramiento para la Escuela Militar permitió a Laplace quedar libre para emprender investigaciones científicas originales, y los pocos años siguientes vieron una inmensa producción de importantes documentos sobre variedad de temas matemáticos, físicos y dinámicos. Sin embargo, no le bastaba brillar solamente en círculos científicos; deseaba además ser igualmente una figura destacada en la vida social y política. La Revolución francesa le dio la oportunidad que anhelaba, y se hizo familiar, primero de la plebe y después de Napoleón. Su carrera política activa empezó cuando persuadió a su antes examinado a darle el puesto de Ministro del Interior. Sólo duró seis semanas en este puesto. Rouse Ball[3] ha transcrito la minuta en la que anotó Napoleón la dimisión de aquél:

> Geómetra de primer orden, no perdió el tiempo en demostrar que como administrador era peor que mediano; su primer trabajo demostró que él mismo se había engañado. No podía ver nada desde el punto de vista de la realidad; buscaba sutilezas dondequiera, tenía sólo ideas problemáticas, y llevaba el espíritu de lo infinitesimal a la administración.

No obstante, Napoleón lo elevó al Senado, probablemente llevado del deseo de quedar en buenas relaciones con el mundo científico. Después, cuando el imperio estaba justamente a punto de caer, en 1814, Laplace desertó de su emperador, trasladó su lealtad a los Borbones, y fue recompensado con un título de marqués.

Aunque la obra astronómica de Newton había sido de gran alcance, escasamente rozaba la superficie del vasto problema planteado por los movimientos de los cuerpos celestes. Newton había tratado los planetas como esferas perfectas, y aun como puntos, y ordinariamente supuso que se movían únicamente bajo la influencia de la atracción del Sol, y la Luna sólo por la de la Tierra, y así sucesivamente. Verdad es que algunas veces había pensado en otras posibilidades, pero sus principales des-

cubrimientos los obtuvo mediante la simplificación de presunciones del género de las mencionadas hace un momento, las cuales redujeron cada problema a su forma más desnuda y descarnada. El problema del firmamento, con todo lo intrincado que es, exigía un análisis mucho más refinado y sutil, y a la edad de 22 años Laplace emprendió su realización.

En los 17 años siguientes (1771-1787) resolvió muchos difíciles problemas de dinámica y de astronomía, y luego aspiró a escribir un libro que debía "ofrecer una completa solución de los grandes problemas mecánicos que presentaba el sistema solar, y llevar la teoría a tan estrecha coincidencia con la observación, que las ecuaciones empíricas no encontraran ya lugar en las tablas astronómicas". El resultado final fue, no un tomo, sino seis. La *Exposición del sistema del mundo,* que salió a luz en 1796, daba amplia explicación general de los resultados obtenidos. La aún más extensa *Mecánica celeste* apareció a continuación en cinco tomos, cuatro que se publicaron desde 1799 a 1805, y el quinto, que era principalmente histórico, en 1825. Éstos contenían un estudio más completo de los problemas del sistema solar, aunque todavía sin tantos detalles como habrían querido la mayor parte de los lectores: porque cuando Laplace se había él mismo convencido de la verdad de un resultado, no se molestaba gran cosa en ayudar a sus lectores a conseguirlo.

Sería imposible mencionar ahora todos los problemas que trató Laplace; entre ellos sobresalen las mareas en los océanos, el achatamiento de la Tierra y otros planetas, y una variedad de problemas resultantes de la atracción gravitatoria de los planetas entre sí. Pueden mencionarse dos problemas especiales, porque ambos son intrínsecamente interesantes y típicos del género de temas estudiados.

El primero constituía el tema del primer documento científico de Laplace, el cual presentó a la Academia de Ciencias en 1773. Los planetas gravitan alrededor del Sol describiendo las

elipses perfectas que esperaríamos encontrar si únicamente dirigiera sus movimientos el Sol. Los otros planetas actúan igualmente sobre ellos, y continuamente tiran de sus órbitas deformándolas; podemos imaginar que esas órbitas estén tan alteradas que, por ejemplo, la Tierra llegara definitivamente a ser inhabitable. Laplace intentó demostrar que no hay base para tales temores. Este resultado estaba en directa oposición a las ideas de Newton, quien había pensado[4] que la acción mutua de los planetas y cometas, unos sobre otros respectivamente, produciría irregularidades "que serían capaces de aumentar hasta que el sistema necesitara una reforma" hecha por la mano del Creador.

Nuestro segundo ejemplo viene del *Sistema del mundo.* Observó Laplace que todos los planetas se mueven en el mismo sentido alrededor del Sol, y que sus satélites se mueven, todos, en este mismo sentido alrededor de sus planetas.[5] En la pregunta que acabamos de citar en la nota 4, Newton comentaba esta regularidad, y pensó que "la fatalidad ciega no podía jamás hacer que todos los planetas se movieran siguiendo el mismo sentido en órbitas concéntricas", y atribuyó la regularidad a un orden introducido por el Creador, el cual, como acabamos de ver, necesitaba circunstancialmente un restablecimiento hecho por Su mano. "Porque correspondía a quien los creó el ponerlos en orden. Y si lo hizo así, es antifilosófico buscar ningún otro origen del mundo, o pretender que pudiera surgir del caos por las simples leyes de la Naturaleza… Tan maravillosa uniformidad en el sistema planetario debe considerarse efecto de una elección."

Laplace coincidió con Newton en que tal regularidad no ofrecía probabilidad alguna de haber resultado por mera casualidad; pero tomó muy diferente punto de vista respecto de su origen. Newton hablaba en favor de un Creador como fuente de la regularidad: Laplace "no tenía necesidad de esta hipóte-

sis", como dijo él a Napoleón cuando le entregó un ejemplar de su libro; consideraba que las causas naturales que habían producido los planetas pudieron, asimismo, producir la regularidad. Y dio a conocer su famosa *hipótesis nebular,* referente al origen de los planetas.

Imaginó que el Sol había comenzado como una masa nebulosa de gas a alta temperatura en estado de rotación. Gradualmente se enfrió, y, a medida de su enfriamiento, se contraía. La mecánica newtoniana requería que girara cada vez más rápidamente a medida que se contraía. Laplace había manifestado que el achatamiento en forma de naranja de la Tierra y los planetas era resultado de sus movimientos de rotación: cuanto más rápidamente giraba un planeta, mayor se haría el achatamiento. De esta suerte, suponía que girando el Sol cada vez más de prisa, su forma se fue haciendo cada vez más aplastada hasta que tomó la forma de un disco. Entonces ya no pudo aplastarse más, pero se rompió en trozos, en anillos sucesivos de su dilatado ecuador. Supuso que estos anillos de materia, por último, se condensaron y formaron los planetas presentes. Éstos, a su vez, comenzaron como masas de gases incandescentes en movimiento rotatorio, y debieron de pasar por la misma serie de cambios que su padre, el Sol, antes que ellos; también éstos se enfriaron, se contrajeron y tomaron forma aplastada, desprendiendo finalmente anillos de materia que con el transcurso del tiempo se condensaron, formando así los satélites de los planetas. Entonces ya era fácil ver por qué los planetas y los satélites tenían movimientos de revolución y de rotación en el mismo sentido; este sentido era el mismo en que había girado el Sol primitivo.

Esta serie de ideas no era enteramente nueva, porque Immanuel Kant, el filósofo alemán, que comenzó su vida como científico, había defendido algo semejante.[6] Probablemente Laplace no tuvo noticia de esto, porque dijo que no sabía de nadie, ex-

cepto Buffon, que se hubiera dedicado a pensar en este asunto, y los pensamientos de Buffon lo llevaron precisamente a una teoría enteramente diferente, según la cual los planetas resultaron de la explosión de algún objeto astronómico que cayera sobre el Sol y lanzara salpicaduras, que fueron los planetas. En todo caso, la hipótesis de Kant era inferior a la de Laplace en muchos aspectos; suponía, por ejemplo, que el Sol había adquirido su rotación a consecuencia de la contracción, lo que es una imposibilidad matemática.

Por el mismo tiempo en que se dio a conocer, y durante muchos años después, la teoría de Laplace fue ampliamente aceptada como plausible e interesante hipótesis respecto del origen de los planetas y de sus satélites; pero su estudio detallado ha demostrado después que es insostenible, por lo menos por dos razones.

La primera es, dicha en breves palabras, que si los planetas hubieran nacido a causa de la rotación constante de un Sol en contracción, el actual Sol contraído debería ahora estar girando con gran velocidad, en tanto que, de hecho, está girando con demasiada lentitud.[7]

La segunda causa que se opone a la teoría de Laplace depende de propiedades de la materia que no eran conocidas en la época de Laplace. Si un gas queda suelto en el espacio, tenderá a dilatarse por causa de su presión interna, y ordinariamente acabaría por repartirse por el espacio. Pero si la cuantía del gas es importante, las atracciones gravitatorias mutuas de las partículas tenderán a reunirlas y, cuando se trate de una gran masa de gas, puede, incluso, neutralizar la tendencia universal a la expansión. Las masas de gas incandescente de Laplace se enfriarían y se contraerían tan lentamente que sólo podrían desprender la materia a gotas. El cálculo demuestra que las masas desprendidas de este modo simplemente se repartirían extendiéndose por el espacio y entonces no podrían condensarse en

planetas. Por estas razones y otras varias, la hipótesis nebular de Laplace ha perdido vigencia por completo.

Astronomía observacional

Al mismo tiempo que acontecía todo esto en astronomía dinámica, la astronomía observacional lograba su propia serie de éxitos. Los nombres principales que hallamos en este camino son Bradley (1693-1762), sir William Herschel (1738-1822) y su hijo, sir John Herschel (1792-1871), F. W. Bessel (1784-1846), F. G. W. Struve (1793-1864), U. J. J. Leverrier (1811-1877) y J. C. Adams (1819-1892).

Bradley (1693-1762). Era Bradley astrónomo real en Greenwich cuando, en 1725, descubrió el importante fenómeno llamado *aberración de la luz*. Cuando navegamos en una nave, en día de completa calma, el movimiento de la nave parece que crea un viento de cara. Y si un viento azota viniendo del Oeste, no parecerá venir de una verdadera dirección occidental, sino de alguna otra dirección que depende de la velocidad de la nave y de la dirección de su ruta (será una especie de término medio entre el viento de cara y un viento del Oeste). Si cambiamos el rumbo de la nave, encontraremos que el viento parecerá cambiar al mismo tiempo su dirección. Bradley descubrió un efecto análogo en astronomía: a medida que la Tierra cambia la dirección de su movimiento alrededor del Sol, la luz de una lejana estrella parece cambiar continuamente la dirección de donde viene. Bradley halló que todas sus observaciones podían explicarse mediante la simple hipótesis que la luz se propagaba al través del espacio con velocidad finita y constante, lo cual aparecía sustancialmente lo mismo que había deducido Römer de sus observaciones de los satélites de Júpiter (p. 232). En conjunto, fue Bradley más que Römer quien conven-

ció al mundo científico de que la luz se propagaba con rapidez finita.

También Bradley descubrió el movimiento de *nutación*. Hemos visto ya cómo Hiparco había descubierto la "precesión de los equinoccios": el eje de rotación de la Tierra no señala permanentemente la misma dirección en el espacio, sino que gira describiendo un círculo que completa en 26 000 años. Bradley encontró entonces que la trayectoria descrita no era una circunferencia perfecta, sino una circunferencia arrugada u ondulada, sufriendo un ligero bamboleo la dirección del polo cada 19 años aproximadamente.

Más adelante midió las posiciones de cierto número de estrellas con gran exactitud, y publicó un catálogo de estrellas en 1755, que resultó de gran valor en fecha posterior, cuando se sometieron a estudio los movimientos de las estrellas.

Herschel (1738-1822). Francis William Herschel nació en 1738 en Hannover, que en aquel tiempo pertenecía a la Corona británica. Fue a Inglaterra como músico profesional, pero pronto abandonó la música para dedicarse a la astronomía. Su interés principal fue la construcción de telescopios y el cálculo de lentes, en el cual adquirió gran habilidad técnica.

Fue más conocido acaso por su descubrimiento del planeta Urano en 1781. Este hecho produjo gran sensación en aquel tiempo, puesto que sólo se conocían cinco planetas desde tiempos prehistóricos y se había incrustado en la mente humana que los planetas tenían que ser cinco forzosamente. Seis años después observó que el planeta recién descubierto iba acompañado de dos satélites y en 1789 añadió dos satélites más, Mimas y Encélado, a los cinco que se sabía acompañaban a Saturno.

El descubrimiento que hizo Herschel de estos nuevos miembros del sistema solar fue en cierto sentido importante, pero su observación y estudio de las "estrellas fijas" fue más fundamen-

tal y de mucha mayor importancia. Hizo cuatro mapas completos de las estrellas del hemisferio norte con instrumentos de su propia construcción, y su hijo sir John Herschel (1792-1871) posteriormente los amplió al firmamento septentrional.

En general se aceptó por entonces que el Sol es una estrella, semejante a las demás estrellas en su estructura, y que es miembro de un gran sistema de estrellas que está aislado en el espacio y constituido por las estrellas de la Vía Láctea. Habíale dado precisión a esta idea Thomas Wright (1711-1786), que fue constructor de instrumentos en Durham.[8] El estudio detallado de las estrellas hecho por Herschel sugirió que este sistema tenía la forma de una rueda, o mejor dicho, de una rueda de molino, y que el Sol estaba próximo a su centro. La primera de estas conclusiones ha resistido a la prueba del tiempo; pero no así la segunda; sabemos ahora que el Sol está muy lejos del centro de la gran rueda de estrellas.

Herschel pudo investigar la forma de este sistema de estrellas, pero no pudo descubrir sus dimensiones, ya que el tiempo en que se pudiera medir la distancia de las estrellas aún no había llegado. Si las estrellas fueran todas de estructura semejante a la del Sol, podía esperarse que todas tuvieran el mismo brillo intrínseco que el Sol; se verían débiles o brillantes sencillamente según sus diferentes distancias a nosotros, y la débil luz de una estrella indicaría su extremado alejamiento. Por ejemplo, suponiendo que Altair fuera del mismo brillo intrínseco que el Sol, Newton había estimado su distancia aproximadamente en cinco años luz, siendo un año luz la distancia que recorre la luz en un año (alrededor de 5 880 000 billones de millas = 9 463 000 billones de kilómetros).[9] Pero la verdadera distancia de una estrella no se midió hasta 1838, y quedaba todavía enorme camino por recorrer desde esto hasta medir la magnitud de la galaxia. Investigaciones recientes han mostrado que el diámetro de la galaxia es del orden de 200 000 años luz, hallándose el Sol

a la distancia de 400 000 años luz del centro de ella, aproximadamente.

Hizo asimismo Herschel una prolongada serie de observaciones sobre conglomerados de estrellas y nebulosas, objetos, estas últimas, visibles como tenuísimos copos de lana, muy pocas de las cuales se pueden ver sin ayuda de poderosos telescopios. Maupertuis las describía como "pequeñas manchas luminosas brillando apenas sobre el fondo negro del firmamento; tienen en común lo siguiente: que sus formas son elipses más o menos alargadas, y que su luz es más tenue que la de todos los demás objetos que podamos ver en el cielo".[10] Maupertuis había supuesto que podrían ser soles inmensos aplastados por causa de su rotación. Kant, el filósofo, discrepó de este punto de vista, diciendo:[11]

> Es mucho más natural y razonable suponer que una nebulosa no es un sol solitario y único, sino un sistema de muchísimos soles que aparecen apiñados, a causa de la distancia, en un espacio tan limitado, que su luz, que sería imperceptible si cada uno de aquéllos estuviera aislado, basta, debido a su inmenso número, para dar un pálido y uniforme resplandor. Su analogía con nuestro sistema de estrellas, su forma, que es precisamente la que debe ser de acuerdo con nuestra teoría; la tenuidad de su luz, que denota infinita distancia, todas están en admirable concordancia, y nos llevan a considerar aquellas manchas elípticas como sistemas del mismo orden que el nuestro: en definitiva, a ser Vías Lácteas.

Esta interpretación de todos esos objetos nebulosos pronto llegó a ser una especulación astronómica admitida, y se le dio el nombre de teoría del *universo isla,* la cual ha resistido la prueba del tiempo, estando en estrecha coincidencia con nuestro conocimiento actual (p. 406).

En 1784, Messier había publicado una lista de 103 de las más destacadas nebulosas y objetos análogos. Herschel se puso entonces a trabajar para extender esta lista, y su hijo lo realizó respecto del firmamento meridional. Su lista final contenía alrededor de 5 080 objetos, de los cuales 4 630 fueron observados por ellos mismos. Después de haber sido de empleo general durante cerca de un siglo, su catálogo fue sustituido por el aún

más comprensivo *Nuevo catálogo general* de Dreyer (1890) y por otras listas de nebulosas.

Herschel estudió, asimismo, los movimientos en el firmamento de las llamadas *estrellas fijas*. Desde los días de Aristóteles y de Ptolomeo se había supuesto que éstas no cambiaban de posición, exceptuando lo que resultaba de su rotación diaria alrededor del polo. Pero Halley había notado en 1718 que Arturo y Sirio no ocupaban ya las posiciones que les había asignado Ptolomeo: por consiguiente, debían de haberse movido respecto de las demás estrellas. Herschel encontró entonces que todas las estrellas, en la mitad del firmamento, aparecían desparramándose, en tanto que en la otra mitad se veían aproximándose entre sí. Dedujo, en conclusión, y acertadamente, como sabemos, que el Sol se mueve avanzando hacia aquella primera mitad del firmamento, y se aleja de la otra mitad. Un estudio detallado de los movimientos (1805) demostró que el Sol se mueve avanzando hacia un punto de la constelación de Hércules a una velocidad de 13 millas (unos 21 kilómetros) aproximadamente por segundo. Y si el Sol tenía un movimiento de tal especie, era natural suponer que todas las estrellas tuvieran análogos movimientos: perdían, por consiguiente, el derecho a ser llamadas estrellas fijas.

También Herschel se ocupó mucho en las *estrellas dobles* (pares de estrellas que se ven muy próximas en el firmamento). Algunos de estos pares de estrellas deben de atribuirse a que una estrella se ve detrás de otra desde la Tierra; pero el número de estos casos es calculable por las leyes de probabilidad y Herschel halló que el resultado de este cálculo caía muy por debajo del número efectivo que se había observado. Por consiguiente, algunos de dichos pares deben consistir de estrellas que marchan juntas por el espacio, probablemente a causa de que están relacionadas físicamente. Sólo el tiempo diría a qué clase pertenecía cada pareja individualizada; las estrellas que estaban aso-

ciadas físicamente probablemente permanecerían próximas entre sí, en tanto que las estrellas que se hallaran en la misma línea visual se moverían apartándose más y más en su viaje por el espacio. En los años de 1782 a 1784 catalogó Herschel las posiciones de estrellas dobles en número alrededor de 700, y en 1803 ya había encontrado que muchas de ellas consistían de estrellas en movimiento de revolución mutuo, una alrededor de la otra exactamente describiendo el género de órbitas que requiere la ley de gravitación de Newton. Estas estrellas marchaban presumiblemente en pareja por sus mutuas atracciones gravitatorias, como la Tierra y la Luna, y demostraban en tal manera que la gravitación no era mero efecto local, sino que se extendía por todo el espacio. El estudio de tales estrellas dobles ha conducido a valiosos e interesantes resultados. Hasta hace pocos años era el único medio de determinar las masas de las estrellas; el astrónomo calcula la fuerza de gravitación necesaria para mantener las estrellas que forman una doble moviéndose en sus órbitas, y de esto, en casos favorables, puede calcular las masas de ambas estrellas. Si ocurre que el plano en que gravitan esas estrellas dobles es casi el de la Tierra, puede verse cómo las dos estrellas se eclipsan respectivamente a medida que avanzan en sus órbitas, y la duración de los eclipses puede descubrir las dimensiones de las estrellas.

No disponemos de espacio para anotar el constante aumento de conocimiento debido a la observación durante este periodo; pero hay cuatro puntos dominantes demasiado importantes para que los pasemos por alto.

Los asteroides. En el comienzo mismo del siglo XIX, el día 1º de enero de 1801, Piazzi descubrió el asteroide Ceres, el mayor de la familia de pequeños planetas que gravitan alrededor del Sol en órbitas situadas entre las de Marte y Júpiter. Ahora se conocen bastante más de un millar de estos cuerpos. Se supone que

son fragmentos dispersos del que fuera un día planeta grande gravitando en el espacio en cuestión.

Las distancias de las estrellas. El año 1838 nos presenta el próximo punto culminante, porque en diciembre de este año Friedrich Wilhelm Bessel, en Königsberg, anunció la primera medida digna de confianza de la distancia de una estrella. Esta era la 61 del Cisne, y Bessel anunció que su distancia era 640 000 veces la distancia de la Tierra al Sol; medidas modernas hacen crecer esta cifra a 680 000. En Dorpat, cerca de San Petersburgo, F. G. W. Struve había medido anteriormente la distancia de Vega (la α de Lira), pero sus medidas, que nunca inspiraron mucha confianza, resultaron definitivamente más del doble de la verdadera distancia. En enero de 1839, Thomas Henderson, astrónomo de Su Majestad en el Cabo, anunció medidas de la distancia de otra estrella, la α de Centauro, medidas que resultaron con un error de un tercio, aproximadamente.

En cada uno de estos casos, el método empleado es el mismo que emplea un topógrafo para medir la distancia de una montaña inaccesible o cualquier otro punto culminante; empieza por medir una línea-base; se sitúa primero en un extremo de esta línea-base; luego pasa al otro extremo tomando desde cada uno la dirección del punto inaccesible y observando lo que ha cambiado esta dirección de un extremo al otro. El astrónomo toma el diámetro de la órbita de la Tierra como línea-base y desde los extremos de este diámetro, a seis meses de diferencia en el tiempo, toma las direcciones a la estrella. Conociendo el ángulo que forman las dos direcciones desde la estrella a cada uno de los extremos de la base, es fácil calcular la distancia de la estrella en relación con las dimensiones de la órbita de la Tierra. Desde 1838 se ha medido la distancia a que se encuentra inmenso número de estrellas; con exactitud siempre creciente. También se han desarrollado nuevos métodos de mayor

categoría, de suerte que hoy pueden medirse con alguna exactitud las dimensiones del universo.

El descubrimiento de Neptuno. En 1846 se añadió uno más a la lista de los planetas. Éstos no describen elipses perfectas, porque se producen irregularidades por causa de las atracciones de los demás planetas, y la órbita de Urano ha presentado irregularidades que no podían atribuirse a las atracciones de los planetas entonces conocidos. Por consiguiente, se pensó que eran ocasionadas por algún planeta aún no descubierto. Esto, por lo menos, le pareció al joven inglés John Couch Adams (1819-1892), quien fue posteriormente profesor de astronomía en Cambridge, y al matemático y astrónomo francés Urbain J. J. Leverrier (1811-1877), y ambos se pusieron a la obra de calcular la órbita en que debiera moverse un planeta desconocido capaz de producir las divergencias observadas en el movimiento de Urano. Adams acabó sus cálculos antes y pidió a los observadores de Cambridge que buscaran el planeta en la posición que debía ocupar según su cálculo. Leverrier hizo después lo mismo con los observadores de Berlín. Pero como Berlín tenía mejores mapas de estrellas que Cambridge, el planeta se identificó primero en Berlín. Otro planeta más, Plutón, fue descubierto de manera semejante por Tombaugh, en el Observatorio de Flagstaff, Arizona, en marzo de 1930.

Espectroscopia astronómica. El último punto culminante, posiblemente el más importante de todos, es la aplicación de la espectroscopia a la astronomía. Hasta entonces, las estrellas se habían considerado como brillantes puntos de luz; desde entonces se convirtieron en gigantes crisoles en los cuales la naturaleza realizaba experimentos que nosotros podíamos vigilar; el espectroscopio estaba ahí para dejar al descubierto su composición química, sus temperaturas y su estado físico, suministrando al mismo tiempo gran variedad de otros conocimientos.

El espectroscopio es un instrumento que analiza la luz, descomponiéndola en sus colores constituyentes, que se despliegan como una banda continua de luz coloreada conocida como un *espectro;* de hecho, está constituido con base en el prisma que empleó Newton con el mismo propósito (p. 240). La ciencia del análisis espectral se fundó virtualmente en 1752, cuando Melvill advirtió que una llama en la cual ardiera una sal o un metal daba un espectro que consistía únicamente en líneas brillantes, cuyo tipo dependía de la sustancia que se estaba quemando. En 1823, sir John Herschel sugirió que se podría identificar posiblemente una sustancia química por el examen de su espectro, y esto abrió la senda a los métodos de la moderna espectroscopia. En 1855, el estadunidense David Alter describió el espectro del hidrógeno, y en los próximos años sucesivos se identificaron gran número de sustancias por R. W. Bunsen (1811-1899), G. R. Kirchhoff (1824-1887), H. E. R. Roscoe (1833-1915) y otros muchos. En el año 1861, Bunsen y Kirchhoff descubrieron nuevos elementos, el cesio y el rubidio, por métodos espectroscópicos.

La aplicación de estos métodos a la astronomía tardó en llegar. En 1802, 50 años después de la observación de Melvill, W. H. Wollaston (1766-1828), habiendo hecho pasar la luz del Sol al través de un prisma, como antes que él hiciera Newton, obtuvo una banda de luz coloreada que no era continua sino que estaba interrumpida acá y allá por líneas oscuras. Las mismas líneas se notaron en 1814 por Joseph Fraunhofer, constructor de instrumentos, bávaro (1787-1826). Utilizando la mayor suma de luz recogida por un telescopio, le fue posible intentar el mismo experimento con la luz de varias estrellas, y obtuvo resultados semejantes, pero no idénticos. También había allí líneas oscuras transversales al espectro, pero ya no se hallaban en la misma posición que ocupaban con la luz solar, y, además, variaban de estrella a estrella.

No había en esto ninguna conexión ostensible entre los espectros estelares y los terrestres; aquéllos consistían en líneas brillantes separadas por espacios oscuros, mientras que los segundos consistían en líneas oscuras separadas por espacios de brillante color continuo. La conexión se estableció en 1829, cuando Foucault observó que una línea oscura en el espectro del Sol, la cual había sido designada como *D,* podía hacerse más brillante o más oscura usando el arco eléctrico. Si la luz solar que iba al espectroscopio había pasado previamente por un arco eléctrico, la línea *D* se veía más oscura que cuando sólo había pasado la luz ordinaria, haciendo pensar que algo había en el arco eléctrico que absorbía la luz de la línea *D.* Pero era algo que podía emitir aquella luz, porque si de repente se retiraba la luz solar, para analizar la luz emitida por el arco, separada de toda luz solar, entonces la misma línea *D* aparecía, pero como *línea brillante.*

Kirchoff y Bunsen hallaron después que las líneas *D,* la brillante y la oscura, una y otra debían su presencia al sodio. Pusieron sodio en una llama y encontraron que la línea *D* se marcaba brillantemente. Hicieron pasar luz de la cal al rojo blanco, que normalmente daba un espectro continuo, a través de una llama de alcohol en la cual se había puesto una pequeña cantidad de sodio, y hallaron una línea oscura justamente en la posición de la línea *D.* Dedujeron, en conclusión, que la sustancia que emitía la línea *D* en el arco eléctrico y la absorbía en la luz solar, era el sodio. Por consecuencia, debe haber sodio en el Sol.

Claro está, el primer paso por seguir era someter el espectro del Sol a la prueba de otros elementos químicos. Trataron de remplazar el sodio por el litio, y obtuvieron un diferente conjunto de líneas espectrales que no pudieron identificarse con ninguna de las líneas de Fraunhofer, de suerte que sacaron la conclusión de que en el Sol había poco o ningún litio. Era esto

el comienzo de una técnica para el estudio de la composición química de las estrellas.

Vasto número de investigadores se embarcó entonces en el estudio de los espectros estelares, siendo los más sobresalientes entre los que primero se empeñaron en esta tarea sir William Huggins (1824-1910), Janssen (1824-1907) y sir Norman Lockyer (1836-1920). La mayor parte de las líneas que éstos encontraron en los espectros pudieron adscribirse a sustancias que ya eran conocidas en la Tierra, y se aceptó que estas mismas sustancias entraban en la composición de las estrellas. Pero esto no era verdad para todas las líneas del espectro. En el año de 1878 encontró Lockyer una línea en el espectro solar que no pudo atribuir a ningún origen conocido, y supuso que ésta debía provenir de algún nuevo elemento hasta entonces desconocido en la Tierra. Al nuevo elemento se le dio el nombre de helio, y en el año 1895 se encontró que era un constituyente normal de la atmósfera terrestre.

Tales fueron los comienzos de la ahora importante ciencia de la espectroscopia, de la cual volveremos a tratar en el próximo capítulo.

Óptica

Después de que las teorías de Newton y de Huygens habían fracasado en explicar la doble refracción del espato de Islandia (p. 246), el tema de la óptica permaneció inactivo a lo largo del siglo XVIII, pero volvió a la vida nuevamente con el advenimiento del siglo XIX. Porque en 1801 Young descubrió la hasta entonces desconocida propiedad del movimiento ondulatorio que se ha descrito como *interferencia,* y se vio que esto era capaz de resolver la mayor parte de los más salientes rompecabezas de la

teoría óptica en términos de una concepción de la luz puramente ondulatoria.

THOMAS YOUNG (1773-1829) fue un notable ejemplo de niño prodigio que poseyó grandes y varias actividades en su madurez, por las cuales se destacó como físico, médico, matemático, lingüista, filólogo, anticuario y erudito. Dícese que fue capaz de leer de corrido a la edad de dos años, y que podía recitar de memoria el *Deserted Village* de Goldsmith antes de tener seis años.[12] A la edad de 19 años ya había adquirido completo conocimiento del latín y del griego, y considerable familiaridad con el hebreo, el caldeo, el árabe, el sirio, el persa, el francés, el italiano y el español, equipo de conocimientos lingüísticos que probó su valía cuando, más adelante en su vida, se interesó por la egiptología y que, finalmente, dio su más valiosa contribución para descifrar la piedra de Roseta en 1815. Se decidió a estudiar la profesión médica y se graduó de doctor en medicina en 1796. Practicó como médico durante gran parte de su vida; pero antes fundó la ciencia de la óptica fisiológica. Ya hemos visto que Kepler había pensado que la presbicia y la miopía resultaban de falta de acomodación del cristalino del ojo. En 1793 Young probó de manera concluyente que la acomodación del ojo para la visión a diferentes distancias resultaba de los cambios en la curvatura del cristalino. Leyó una memoria sobre este tema en la Royal Society, en mayo de 1793, y fue elegido miembro de esta corporación un año después, inmediatamente que cumplió 21 años de edad.

En 1798 realizó algunos experimentos sobre la luz y el sonido, los cuales describió ante la Royal Society en noviembre de 1801.[13] Para explicar sus resultados imaginó una sucesión de rizos avanzando sobre el agua de un lago y siguiendo por un estrecho canal que salía fuera del lago mismo. Supongamos que después de cierta distancia este canal se une con otro que viene del lago y por él avanzan propagándose ondas semejantes. Más

allá de la unión de ambos canales, los dos trenes de ondas, naturalmente, se mezclarán y seguirán avanzando juntos.

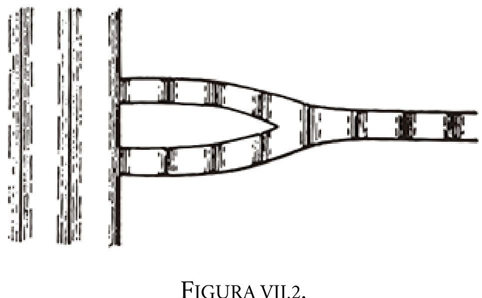


FIGURA VII.2.

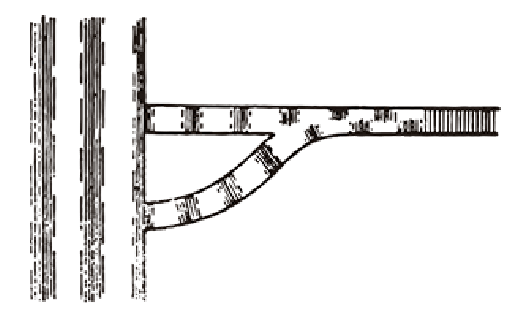


FIGURA VII.3.

Si los dos canales son exactamente semejantes, los dos trenes de ondas serán exactamente similares cuando se encuentren y, por tanto, simplemente se sumarán en ondas de doble altura (fig. VII.2.). Pero si los canales son de longitudes diferentes, puede ocurrir que las crestas de un tren de ondas coincidan exactamente con los valles del otro tren cuando se encuentren y llenen precisamente estos valles; en este caso, la superficie del agua permanecerá enteramente llana. Young describió la destrucción mutua de los dos trenes de ondas como "interferencia", añadiendo: "Yo sostengo que semejantes efectos tendrán lugar dondequiera que dos porciones de luz se mezclen de la misma manera, y a esto lo llamo ley general de la interferencia de la luz".

La teoría a la vez se presenta y prueba en uno de los experimentos de Young. Hacía que la luz emanando de una fuente luminosa *L* (figura VII.4.) iluminara una tarjeta en la cual se habían

hecho dos agujeros con la punta de un alfiler, *A* y *B.* Después de pasar la luz a través de estos agujeros se encontraba con otra pantalla *MN* más alejada. Los dos agujeros representaban los dos canales de la explicación de Young, y la luz podía llegar a cualquier punto *M* de la pantalla inferior por cualquiera de las dos vías alternativas, *LAM, LBM.* Si el punto *M* está directamente bajo *L,* estas dos vías son exactamente de igual longitud, de suerte que las crestas de onda que se han propagado a través de *A* coinciden exactamente con las crestas de onda que se propagaron a través de *B.* Las iluminaciones que llegan a través de *A* y de *B* se reforzarán mutuamente.

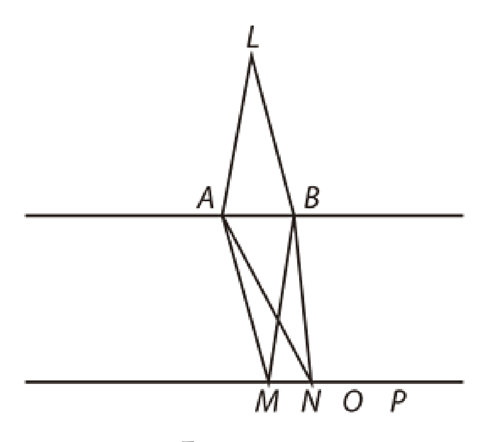


FIGURA VII.4.

En otro punto, tal como *N,* corrientemente esto no será así, puesto que las vías *LAN* y *LBN* no son generalmente iguales. Si sus longitudes difieren exactamente en una onda completa (en una "longitud de onda") de la luz, entonces la cresta de un lado caerá sobre la cresta del otro lado y las ondas se sumarán, reforzando la luz. Lo mismo sucederá si la diferencia de longitud es cualquier número exacto de longitudes de onda. Pero si la diferencia de ambas vías de propagación es exactamente de media longitud de onda, entonces una cresta cae sobre un valle, y los dos trenes de ondas se neutralizan mutuamente por interferencia. No habrá luz alguna en *N,* sino completa oscuridad.

Lo mismo sucederá si la diferencia de las vías de propagación es de 1 ½ longitud de onda o si es igual o un número exacto de longitudes de onda más ½ longitud de onda. De esta suerte podemos tener plena iluminación en *M,* completa oscuridad en *N,* plena iluminación nuevamente en *O* y así sucesivamente, dando alternación regular de luz y sombra que se describe como pauta de interferencia. Young halló que todas estas predicciones teóricas las confirmaba la experimentación, con otras muchas.

Todo esto parece bastante sencillo y convincente en la hora actual, pero su importancia no se comprendió en aquel tiempo, y la obra de Young se condenó primero y se ignoró después, y un crítico adverso censuró a la Royal Society por imprimir tales "mezquinos e insustanciales documentos", los cuales consideraba "desprovistos de toda especie de mérito".

Unos 14 años más tarde Fresnel se ocupó en este tema y lo desarrolló con gran habilidad matemática. Demostró que la teoría del movimiento ondulatorio podía explicar todos los fenómenos de óptica conocidos entonces, incluyendo la doble refracción del espato de Islandia, que había presentado un obstáculo insuperable a las anteriores teorías de Newton y de Huygens. Desde entonces en adelante se convino generalmente en que la luz debe consistir en ondulaciones, puesto que parecía imposible que dos corrientes de partículas pudieran neutralizarse mutuamente de la manera que se había observado. De ordinario se creía que las ondulaciones ocurrían "en el éter", pero las cuestiones de lo que fuera el éter y de cómo ondulaba permanecieron sin respuesta durante largo tiempo (pp. 331 y 332).

Los experimentos descritos se hicieron con luz monocromática; esto es, con luz de uno solo de los colores del espectro. Si se hubiera usado la luz blanca, como los diferentes colores constituyentes de la luz tienen diferentes longitudes de onda, habrían producido pautas de diferentes tamaños sobre la pan-

talla, siendo el resultado una complicada pauta de colores vivos. Se puede deducir la longitud de onda de la luz de las dimensiones de la pauta formada por luz de un solo color. Fresnel encontró, en 1821, que la luz roja tenía unas 40 000 ondas por pulgada, y la luz violeta aproximadamente 80 000, y, por consiguiente, los colores intermedios tenían longitudes de onda, asimismo, intermedias.

Por remotos que parezcan ser los dos temas, el éxito de la teoría de las ondulaciones estaba íntimamente conectado con el principio de Fermat, que decía que el tiempo de propagación de un rayo de luz alcanza un mínimo valor a lo largo de la trayectoria real de propagación del rayo. En cualquier punto de esta trayectoria podemos, como propuso Huygens, imaginar que están llegando por diferentes caminos innumerables pequeñas ondas. Como el tiempo de propagación a lo largo de la trayectoria efectiva es un mínimo, el tiempo de propagación por cualquier trayectoria contigua debe ser sustancialmente el mismo,[14] de suerte que si se mezclan varios trenes de ondas, las crestas coincidirán exactamente con las crestas, y los trenes de ondas se reforzarán respectivamente. Por tanto, habrá una acumulación de luz a lo largo de la trayectoria de tiempo mínimo; pero no en cualquier otra parte, y se ve que el principio de Fermat es directa e inevitable consecuencia de la teoría ondulatoria de la luz.

En 1849, H. L. Fizeau midió la velocidad de la luz en el aire y halló, aproximadamente, que era la de 315 300 kilómetros por segundo. Al año siguiente, su contemporáneo J. L. Foucault dio comienzo a una serie prolongada de experimentos por un método diferente y obtuvo el valor mucho más exacto de 298 600 kilómetros por segundo. Mediante procedimientos modernos, extraordinariamente delicados, Michelson ha hallado la velocidad de la luz, que es de 299 770 kilómetros por segundo, aproximadamente. Foucault probó, asimismo, que la luz se propa-

gaba menos rápidamente en un medio más denso, siendo la disminución de velocidad exactamente la que requería el teorema de Fermat y la teoría ondulatoria de la luz. Esto puso el clavo final al ataúd de la teoría corpuscular de la luz, la cual solamente podía explicar la refracción de la luz determinando que ésta se propagaba *más rápidamente* en medios más densos.

La estructura de la materia

En su *Óptica* Newton había publicado sus maduras reflexiones sobre cierto número de cuestiones que no tenían muy directa conexión con la óptica, y en particular sobre la estructura de la materia, en lo cual parece que meditó mucho. En la última pregunta (la 31) sobre óptica, escribe lo siguiente:

> Consideradas todas estas cosas, me parece probable que Dios, en el principio, formó la materia en sólidas, macizas, duras, impenetrables, movibles partículas, de tales tamaños y figuras, y con tales otras propiedades, y en tal proporción al espacio, que en su mayor parte conducen al fin para el cual fueron formadas; y que siendo sólidas estas primitivas partículas, son incomparablemente más duras que todos los cuerpos porosos compuestos por ellas; incluso tan durísimas, que nunca podrán desgastarse ni romperse en pedazos; ningún poder ordinario es capaz de dividir lo que Dios mismo hizo uno en la creación primordial.

Era esto la vuelta directa al atomismo de Demócrito y de Gassendi, y, en verdad, era probablemente característico de las opiniones defendidas a principios del siglo XVIII.

En la misma pregunta escribió Newton:

> Ahora bien, las más pequeñas partículas de materia pueden unirse por muy fuertes atracciones y componer partículas más gruesas, cuya virtud es más débil todavía, y así sucesivamente por diversas sucesiones […] Si el cuerpo es compacto, y se encorva o cede internamente a la presión sin que resbale ninguna de sus partes, es duro y elástico, y recobra su figura con una fuerza que brota de la atracción mutua de sus partes. Si las partes resbalan una sobre otra, el cuerpo es maleable o blando […] Como los metales disueltos en ácidos no atraen más que una pequeña cantidad del ácido, su fuerza atractiva no puede alcanzar sino a una pequeña distancia de ellos […]

Esta última frase nos presenta otro punto de vista comúnmente sostenido en este periodo: que las propiedades de la ma-

teria y, especialmente sus propiedades químicas, podrían explicarse por medio de fuerzas de corta amplitud que obrarían entre las más íntimas partículas de la materia. Esto había sido sugerido por Boyle en 1664, por Hooke en 1665, y por Newton en el prólogo a sus *Principia* (1687) en palabras que ya hemos citado (p. 223). Huygens había dicho casi lo mismo en 1690: "En verdadera filosofía, las causas de todos los fenómenos naturales se conciben en términos mecánicos. Debemos, en mi opinión, hacerlo así o, de otra manera, perder toda esperanza de comprender jamás ninguna cosa en física".[15]

He ahí, pues, una escuela de pensamiento que describía mecánicamente el total del universo, y todos los fenómenos naturales como prueba de las fuerzas que actúan sobre la materia. Pero otra escuela de pensamiento imaginaba que la materia no consistía únicamente en "partículas sólidas macizas", sino que, asimismo, contenía una variedad de "imponderables", acaso también en la forma de diminutas partículas y que de éstas dependían muchas de las cualidades que pudieran afectar la materia.

Por ejemplo, se suponía que un cuerpo era combustible porque contenía *flogisto,* palabra que ha sido introducida en la ciencia en 1702 por Georg Ernest Stahl (1660-1734), que posteriormente llegó a ser médico del rey de Prusia. Cuanto más flogisto contenía un cuerpo, más rápidamente ardía; mas, a medida que ardía, el flogisto escapaba de aquél; esto explicaba por qué un cuerpo cambia sus cualidades cuando se quema, y por qué el mismo cuerpo no puede arder dos veces. Era el flogisto, de hecho, una especie de descendiente del "azufre" que los alquimistas árabes consideraban como el principio del fuego. No obstante, si eso sucediere, el peso de un cuerpo habría disminuido en la combustión, en tanto que Rey y Boyle (p. 249) habían demostrado, ambos, que aumentaba.

Otro supuesto imponderable era el “calórico”, que penetraba por los poros de los cuerpos, y los hacía calientes o fríos con arreglo a lo mucho o poco de aquél que contuvieran. Para explicar muchos de los fenómenos referentes al calor decían que se comprimía al manejarlo; por ejemplo, un cuerpo golpeado con un martillo comprimía el calor de la superficie. Había, asimismo, corpúsculos por medio de los cuales Newton intentó explicar la luz (p. 244), y los *fluidos eléctricos* o *efluvios sutiles*, por medio de los cuales Gilbert trató de explicar las atracciones y repulsiones eléctricas. Finalmente, había el éter u otro medio que llenaba el espacio entero, transmitiendo la luz y sirviendo igualmente a otros innumerables propósitos. Kepler acostumbraba a emplearlo para explicar cómo el Sol mantenía a los planetas en movimiento, Descartes para proporcionar material básico a sus torbellinos, y Gilbert para explicar los fenómenos magnéticos; en general, facilitaba una explicación conveniente de los fenómenos que no era fácil explicar de otra manera.

Gradualmente, certeros experimentos suprimieron la existencia de todos los imponderables, excepto el éter; éste, en su capacidad especial de transmitir las ondulaciones luminosas, se deslizó en los primeros años del siglo presente. La narración de la eliminación de los demás imponderables forma una gran parte de la historia de la ciencia del siglo XVIII.

De manera muy importante, sin embargo, el siglo XVIII fue el periodo en el cual se estudiaron las sustancias más corrientes, como el aire y el agua, y se determinó su composición química, al mismo tiempo que los elementos más comunes y los gases más simples se aislaron y se comprobaron sus propiedades. Nosotros, hombres de hoy, damos por concedido que el agua es un “compuesto químico”, constituido por dos “elementos”, hidrógeno y oxígeno, y que el aire es una “mezcla mecánica” de las “moléculas de los dos gases”, nitrógeno y oxígeno; no sólo ignoraban esto nuestros predecesores científicos de hace 200

años, sino que, además, ninguna de las palabras puestas aquí entre comillas tenía significado alguno preciso para ellos. La palabra *gas,* que entonces entró por vez primera en uso corriente, corrupción de la palabra griega *chaos* (caos), había sido introducida tan lejos como 1644 por el químico flamenco Jan Baptist van Helmont (1577-1644). Éste había llegado a dar por cierto que debe de haber muchos géneros de gases, pero no pudo estudiar sus propiedades, ya que no tenía ningún medio de aislarlos.

Black. El primer paso en este camino lo dio el químico escocés Joseph Black, de Edimburgo (1728-1799). En 1756[16] comprobó la existencia de un gas, diferente del aire, al cual se le podía combinar con variedad de sustancias, pero que, asimismo, podía existir en estado libre. Era el dióxido de carbono, pero lo llamó *aire fijo,* porque podía ser aislado por combinación con otras sustancias.

Cavendish. El paso inmediato lo dio 10 años más tarde el extraño genio Henry Cavendish (1731-1810), quien, no obstante sus muchas excentricidades, fue uno de los más grandes hombres de ciencia de su época. Era una trágica acumulación de inhibiciones y complejos, tan tímido que le costaba mucho trabajo hablar a quienquiera, especialmente a las mujeres, y en caso de hablar no era capaz de otra cosa que de su ciencia. De esta suerte representaba una figura ridícula y patética en la vida; e incluso en la muerte. Pasados dos días enfermo en cama, anunció a su criado que iba a morir y le instruyó para que se apartara de su vista durante algunas horas. La vez primera que el criado entró de nuevo en la alcoba le gruñó que saliera; la segunda vez encontró muerto a su amo.

En 1766 anunció Cavendish el descubrimiento de otro nuevo gas, el cual denominó *aire inflamable*. Lo produjo por la acción de los ácidos sobre metales, e investigó muchas de sus

propiedades. Era, naturalmente, el hidrógeno. Como ocurrió con el "aire fijo" de Black, la elección de nombre demuestra que todos los gases, en aquel tiempo, se consideraban como meras modificaciones del aire atmosférico.

Priestley. En los pocos años siguientes, Joseph Priestley, de Yorkshire (1733-1804), descubrió otros gases. En muchos aspectos, excepto en capacidad científica, era el extremo opuesto a Cavendish. Éste había nacido entre esplendores con línea de duques antepasados suyos; Priestley era hijo de un pañero y de la hija de un labrador. Cavendish murió dejando un millón de libras que no supo cómo gastar; Priestley era pobre, con frecuencia indigente, y, no obstante, se arregló para crearse una vida alegremente feliz y de contento, en señalado contraste con la vida infinitamente melancólica e infeliz de Cavendish. A éste no le interesaba nada más que su ciencia; pero Priestley fue un hombre al que le interesaban muchas cosas y que tuvo muchas ocupaciones, una de éstas la ciencia. Su profesión era la de pastor, primero presbiteriano y después unitario.

Su primer descubrimiento en química fue "la muy agradable agua burbujeante" que ahora conocemos como agua de soda (gaseosa) y que, naturalmente, era simplemente el "aire fijo" de Black disuelto en agua bajo presión. Priestley pensó que podía servir para la curación del escorbuto, y persuadió al almirantazgo para que lo pusiera a prueba, lo que se hizo dotando dos navíos de guerra con generadores de agua de soda. Entre sus más importantes realizaciones debe citarse, en primer lugar, el redescubrimiento del oxígeno en el año de 1774 (p. 304 y 305).[17] Lo halló mientras examinaba los efectos del calor sobre varias sustancias que flotaban sobre mercurio dentro de una vasija cerrada, las que calentaba con los rayos de una lente. Halló que cuando el óxido de mercurio se trataba de esta suerte, desprendía un nuevo gas en el cual ardían las llamas de manera más brillante y la respiración era más vigorosa que en el aire

ordinario. Anteriormente, en 1771, había observado que el aire que ya no servía para mantener la combustión o la respiración (p. 251) recobraba sus poderes si se introducía en él plantas verdes, bastando incluso una ramilla de menta o de margaritas. Fácilmente se comprendió entonces la causa: el nuevo gas debía de ser evidentemente esencial a la combustión y a la respiración, y era exudado por las plantas frescas. Estas propiedades identificaron el nuevo gas con el que Hooke y Boyle habían postulado en 1662 y Mayow en 1668 y que había sido preparado obteniéndolo del salitre en 1678 por Borch. Priestley lo llamó *aire desflogisticado,* porque parecía ser ávido del flogisto y de captarlo cuando ambos se ponían en contacto.

También descubrió Priestley los óxidos nítrico y nitroso, el gas ácido clorhídrico, el anhídrido sulfuroso y el tetrafluoruro de silicio. Tenía la costumbre de recoger los gases desprendidos pasándolos a través del mercurio en vez de a través del agua, como hacían otros, con lo que obtenía gases que otros no advertían porque eran solubles en el agua.

También se atribuye a Priestley, aunque muy indirectamente, el descubrimiento de que el agua es un cuerpo compuesto y no un elemento químico simple. En cierta ocasión, "para divertir a unos amigos filósofos", hizo estallar una mezcla de aire común e hidrógeno introduciendo en la mezcla una chispa eléctrica, y observó que las paredes de la vasija que contenía la mezcla se cubrían de vaho. Cavendish repitió este experimento, examinó la naturaleza de la humedad que se adhería a las paredes y halló que era agua pura. Siguiendo esta pista, halló que el agua consistía en aire desflogisticado de Priestley y su propio "aire inflamable" en la relación aproximada de 195 a 370 del volumen, o muy aproximadamente en la relación de uno a dos. Confirmó esta prueba suya en 1781 produciendo agua por síntesis con una mezcla de los dos gases.

El descubrimiento del oxígeno por Priestley no dio el golpe de gracia, como podía esperarse, a la teoría del flogisto, y la ciencia continuó entorpecida con éste y otros imponderables, como, asimismo, con reliquias de tiempos aún más lejanos, incluyendo los cuatro "elementos" de Empédocles, y las cuatro cualidades primarias de las cuales se suponían estaban compuestos éstos. Por ejemplo, los partidarios de Empédocles habían dicho que la tierra era mezcla de frío y sequedad, mientras que el agua era mezcla de frío y humedad. Por consiguiente, si la humedad se cambiaba en sequedad, el agua se transformaba en tierra. Todavía en el siglo XVIII se creía que el agua podía cambiarse en tierra por el simple expediente de ponerla en ebullición. Newton explicó su idea de que "la naturaleza parece complacerse con transmutaciones", diciendo que "el agua, por medio de frecuentes destilaciones, se transforma en tierra estable".[18]

LAVOISIER. Ésta y otras análogas reliquias del pasado las arrinconaron, finalmente, los experimentos del químico francés Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), el cual tiene más derecho que la mayor parte de los que lo reclaman al título de padre de la química moderna, puesto que en sus manos adoptó realmente la química las ideas y los métodos modernos. Nacido en París, de una familia de reputados hombres de leyes, fue enviado a estudiar derecho, a pesar de haber demostrado en la escuela dotes particulares para la ciencia. Sin embargo, a la temprana edad de 21 años ganó el premio de la Academia de Ciencias de París por un ensayo sobre el alumbrado público. Dos años después fue elegido para la Academia y al año siguiente ingresó como miembro ordinario con plenitud de derechos. Mas, como su gran contemporáneo Laplace, no se contentó con una vida puramente científica.

A las pocas semanas de su elección para la Academia se hizo miembro de la corporación de "recaudadores generales", inten-

samente impopulares, a quienes el gobierno arrendaba la recaudación de contribuciones, y desde entonces distribuyó su vida entre los dos mundos, el de la ciencia y el del negocio, éste de tipo un tanto desagradable. A la edad de 28 años contrajo matrimonio con la hija de otro recaudador de impuestos que le aportó juventud y belleza, fortuna e inteligencia, tanto como simpatía y ayuda activa en su carrera científica; todo hace creer que fue un matrimonio verdaderamente dichoso.

Cuando sobrevino la revolución se produjo intensa cólera contra los recaudadores generales, quienes, todos y cada uno, se habían hecho ricos a expensas del pueblo; todos ellos fueron detenidos, juzgados y condenados a la guillotina. Se hicieron gestiones para eximir a Lavoisier en reconocimiento a su categoría científica eminente y por los servicios que hizo a la ciencia; pero la impopularidad general de los recaudadores pesaba demasiado en el otro platillo de la balanza, y el juez, haciendo la observación de que "la República no necesita de sabios", decidió que se cumpliera la ley. De esta suerte murió el químico más grande de su tiempo, a la edad de 51 años.

En 1770 Lavoisier echó por tierra la antigua leyenda de que el agua podía transmutarse en tierra, demostrando que de cualquier manera que el agua fuera hervida y destilada, el resultado final era siempre agua pura, en masa igual que la del agua con la cual se diera comienzo al experimento. El secreto del éxito de Priestley había consistido en el simple y único procedimiento de recoger los gases a través del mercurio en vez de recogerlos a través del agua, en la cual se disuelven algunos. El de Lavoisier parece haber sido aún más sencillo; debemos hacer constar que fue el primero que experimentó con recipientes perfectamente limpios.

Poco después (1774-1778), se ocupó acerca de la idea predominante de que la masa puede cambiarse mediante acción química. Cuando se calcinaban los metales, aumentaban su masa;

pero Lavoisier demostró que esto ocurría simplemente porque extraían del aire alguna cosa; cuando esto se tuvo en cuenta y se descontó en la proporción justa, la masa total no mostró cambio alguno. Demostró que igualmente ocurría con la respiración, a la que calificó como un tipo de combustión lenta. De esta manera planteó la idea de que la masa es algo permanente e indestructible, algo que se conservaba al través de todos los cambios. Newton había enunciado la idea de una masa que permanecía constante a través de todos los cambios *dinámicos* (esto es, a través de todo cambio de movimiento); Lavoisier ahora demostraba que lo mismo era verdad para los cambios químicos.

Lavoisier había trabajado con el oxígeno antes de que Priestley hubiera anunciado su descubrimiento; mas parece probable que Priestley le dijera cómo obtenerlo del minio cuando se entrevistaron en París en octubre de 1774.[19] El primer anuncio que hizo Priestley de su descubrimiento fue en una carta a la Royal Society fechada en 15 de marzo de 1775, y se leyó una semana después, mientras que Lavoisier anunció el oxígeno como descubrimiento suyo en la asamblea de la Academia Francesa, en 26 de abril del mismo año sin hacer mención alguna del nombre de Priestley. Un tanto justamente, Lavoisier fue acusado de plagio; pero en 1782 se refirió al oxígeno como "el aire que descubrió Mr. Priestley hacia los mismos días en que yo también lo descubrí, e incluso, yo creo, antes que yo".

Entonces Lavoisier se empeñó en un estudio sobre la composición química de varias sustancias. Empezó por las más sencillas: el aire y el agua, y fue capaz de demostrar, en el año 1777, que "el aire atmosférico no es una sustancia simple, un elemento, como creían los antiguos, y como se ha supuesto hasta ahora", y expresó la proporción de sus dos constituyentes como de tres a uno, siendo la verdadera relación del nitrógeno al oxígeno la de 78 a 21, aproximadamente. Siete años después re-

pitió los experimentos de Priestley y de Cavendish sobre la composición del agua, confirmó sus conclusiones, y dio sus nombres actuales a sus dos gases constituyentes: hidrógeno (engendrador de agua) y oxígeno (engendrador de ácidos).

Después continuó con el análisis de sustancias complejas, en sus elementos, adoptando la definición de Boyle de que un elemento es una sustancia tan simple que ya no puede descomponerse. Dividió los elementos así obtenidos en cuatro clases. La primera comprendía los gases hidrógeno, oxígeno y nitrógeno y los imponderables luz y calor; la segunda, los elementos que formaban ácidos cuando se trataban por el oxígeno; la tercera, los metales; la cuarta, varios productos térreos, como la cal y la magnesia, los cuales tomó Lavoisier como elementos, porque no pudo descomponerlos.

Rumford. El flogisto había desaparecido del reino de las cosas cuando Lavoisier demostró que la masa se conservaba sin contar para nada con él. A continuación fue el calórico, desechado principalmente por los trabajos de un estadunidense, Benjamin Thompson (1753-1814), más conocido como el conde Rumford de Baviera, título que adquirió de la administración del reino del príncipe Maximiliano durante muchos años. Tuvo algo de viajero y de aventurero, pero finalmente se estabilizó y se casó con la viuda de Lavoisier, aunque sólo por breve tiempo, porque aquel matrimonio resultó tan desdichado para ella como feliz había sido el primero.

En el campo científico, lo que le interesó a Rumford fue, en su mayor parte, de tipo práctico. En general, se le atribuye la invención de la calefacción a vapor y de la moderna chimenea, que visiblemente da menos humo que las que construían los predecesores de Rumford. En 1796 publicó una *Indagación concerniente al origen del calor generado por fricción,* en la cual hacía observar que taladrando un cañón, el metal se calienta, no existiendo virtualmente ningún límite a la suma de calor que puede

producirse. El calentamiento ordinario, como el de una marmita sobre el fuego, se había explicado usualmente como transmisión de calórico; pero tal explicación ya no era posible, puesto que parecía no haber límite a la suma de calor que se necesitara transmitir. Rumford opinaba que esto, más que calor, era probablemente "un género de movimiento".

Intentó probar experimentalmente esta suposición. Se necesitaba gran cantidad de calor para derretir hielo en el agua, de suerte que si la teoría del calórico fuera cierta, el hielo podía transformarse en agua únicamente mediante la adquisición de gran cantidad de calórico, con el correspondiente aumento de masa. Pero Rumford halló en 1799 que el agua resultante de derretir el hielo pesaba exactamente igual que el hielo original, con un error menor que una millonésima. Asimismo, afirmó que el calor carece de peso, y, por tanto, no podía ser una sustancia, sino que había de ser "un movimiento intestino o vibratorio de las partes constituyentes de los cuerpos calentados". En el mismo año (1799), sir Humphrey Davy anunció la misma conclusión como resultado de los equivocados experimentos que había realizado tres años antes; el calor, decía, era "un movimiento vibratorio de los corpúsculos de los cuerpos".

La química en el siglo XIX

A principios del siglo XIX la mayor parte de los hombres de ciencia habían suprimido de sus vocabularios el flogisto y el calórico, y habían llegado a reconocer que la combustión era un simple proceso de combinación con el oxígeno, y el calor no era más que un movimiento de las partículas íntimas de la materia. Se habían aislado y estudiado las sustancias más comunes, al mismo tiempo que Black, Cavendish, Priestley, Lavoisier y otros habían demostrado que las medidas químicas cuantitativas podían llevarse a cabo con gran exactitud. El camino real

quedó entonces abierto al estudio exacto de las leyes que rigen la combinación química, o sea: por qué y cómo se combinaban las sustancias para formar otras y nuevas sustancias químicas.

PROUST. La primera gran etapa en este camino real la hizo el químico francés Joseph Louis Proust (1755-1826). Examinó cuáles eran las proporciones de hidrógeno y oxígeno en varias muestras de agua y halló que siempre eran las mismas, de dondequiera y como quiera que se hubiera obtenido el agua: un gramo de hidrógeno por ocho gramos de oxígeno. Halló después que tal semejante uniformidad se mantenía en otros compuestos, y esto lo llevó a formular su *ley de las proporciones definidas:* "En todos los compuestos químicos, los diferentes constituyentes entran en proporciones invariables". Esto se comprobó en muchos otros compuestos por J. B. Richter (1762-1807) y E. G. Fischer (1754-1831), y otros, y se redactaron tablas de proporciones.

DALTON. Otro gran adelanto lo consiguió por entonces el cuáquero John Dalton (1766-1844), hijo de un tejedor de Westmorland, que recibió enseñanza primaria en una escuela de Manchester y estudió ciencias en su tiempo libre. Le preocupaba a Dalton por qué los gases más pesados y los más ligeros no se separaban en la atmósfera, como el aceite y el agua, y dedujo en conclusión que los gases constituyentes deben de existir en la forma de pequeñas partículas, o átomos del género que habían imaginado Leucipo y Demócrito (p. 58), y que en la atmósfera deben estar completamente mezcladas.

Esto dio nueva luz a las leyes de Proust sobre las proporciones definidas. No había más que suponer que los diminutos átomos pudieran combinarse en pequeños grupos de estructura uniforme y de esta manera formar sustancias más complejas, y el misterio de esta ley quedaba completamente resuelto. Indicó Dalton, por ejemplo, que el óxido de carbono está formado

por átomos de carbono y oxígeno, aparejados, uno de carbono con otro de oxígeno, en tanto que el anhídrido carbónico resultaba de un solo átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno.

Si así fuere, entonces las proporciones definidas de la ley de Proust revelarían, naturalmente, los pesos relativos de los diferentes géneros de átomos. El anhídrido carbónico, por ejemplo, se sabía que estaba formado por tres gramos de carbono por cada ocho gramos de oxígeno; por tanto, si contenía dos veces tantos átomos de oxígeno como de carbono, los pesos de los átomos del carbono y del oxígeno deben de estar en relación de tres a cuatro.[20]

Hipótesis de Prout. Cuando se habían determinado de aquella manera los pesos relativos de muchos átomos, surgió el hecho extraño de que los pesos de la mayoría de los átomos eran múltiplos exactos del peso de un átomo de hidrógeno, o se aproximaban mucho. El médico inglés William Prout (1785-1850) llamó la atención sobre este hecho en 1815, y opinó que toda materia podía consistir simplemente en átomos de hidrógeno. Por ejemplo, el átomo de oxígeno, con un peso igual a 16 veces el peso del átomo de hidrógeno;[21] podía estar formado de 16 átomos de hidrógeno que de algún modo se habían unido. A la interrogación de Tales: “¿Qué cosa es la sustancia fundamental del universo?”, Prout daba esta respuesta: el hidrógeno.

Si los constituyentes de un compuesto son gaseosos todos ellos, la proporción en que se combinan puede medirse por el volumen; se ha comprobado, por ejemplo, que un volumen de oxígeno se combina exactamente con dos volúmenes de hidrógeno para formar agua, y en 1808, el químico francés Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) anunció que siempre existe una relación numérica sencilla de este tipo. Las relaciones, sin embargo, pueden exponerse en forma todavía más sencilla; de to-

do lo que acaba de mencionarse podemos deducir que, en igualdad de condiciones, un número de átomos de oxígeno ocupa el mismo volumen que igual número de átomos de hidrógeno.

Éste es solamente un caso de la ley más sencilla y mucho más general que se conoce generalmente como *ley de Avogadro,* que dice así: "Bajo las mismas condiciones de presión y de temperatura, un volumen dado de un gas contendrá siempre el mismo número de moléculas, cualquiera que sea la naturaleza del gas". En el año de 1813, el químico italiano Amedeo Avogadro había visto que las leyes de Gay-Lussac y de Dalton deben comprender una ley sencilla de tipo general; pero durante largo tiempo hubo alguna duda respecto de la relación exacta, hasta que finalmente el químico italiano Stanislao Canizzaro (1826-1910) esclareció el asunto en 1858. Avogadro ya había presentado la palabra *molécula* para denotar los pequeños grupos en que se combinan los átomos, y Canizzaro demostró que la verdadera forma de la relación era la expuesta hace un momento. Entonces cobró importancia el hecho de descubrir el número de moléculas que contiene un gas a cualquier temperatura y presión conocidas. En un gas a la temperatura y presión atmosférica normal se encontró que el número por centímetro cúbico era aproximadamente igual a $2\,685 \times 10^{19}$, número que ordinariamente se conoce como *número de Loschmidt*.

Desde mucho tiempo antes se entendía claramente que las propiedades físicas de los elementos no eran meras clasificaciones al azar. Más bien, al contrario, ocurre que los elementos forman grupos cuyos miembros poseen propiedades semejantes, aunque no idénticas. Existe, por ejemplo, el grupo de los metales, e igualmente el grupo de los gases monoatómicos en los cuales son tan inertes los átomos que no forman compuestos con átomos de otras sustancias, ni incluso ellos entre sí. Entonces empezaron los químicos a preguntarse cómo se relacio-

naban las propiedades físicas de los diversos elementos con sus pesos atómicos. Este problema lo estudiaron especialmente Lothar Meyer (1830-1895) y Dimitri Mendeleiev (1834-1907), el último de los cuales construyó la *tabla periódica de los elementos* que figura de manera tan prominente en la química moderna.

Es posible que se pensara de antemano que los elementos de elevado peso atómico presentarían un grupo de propiedades, los de pequeño peso atómico otro distinto, y así sucesivamente; pero la tabla periódica muestra algo muy diferente. Si los elementos se disponen en orden según su peso atómico creciente, y se numeran 1, 2, 3, etc., se ve entonces que los elementos numerados 2, 10, 18, 36, 54, presentan propiedades semejantes; de igual manera los numerados 3, 11, 19, etc., presentan asimismo propiedades semejantes, aunque diferentes de las presentadas por el grupo anterior, y así sucesivamente; las propiedades se repiten periódicamente. Existe una razón física para todo esto, como veremos más adelante, pero se tardó largo tiempo en encontrarla.

Energía y termodinámica

El problema de la estructura de la materia estaba entonces basado en sólidos cimientos, de manera que fue posible volver a ocuparse en los problemas referentes a cómo se conduce la materia.

Carnot (1796-1831). En 1824, un ingeniero francés, Sadi Carnot, dio a la luz pública la sola y única publicación de su vida científica: *Reflexiones sobre la fuerza motriz del fuego.* Era un documento notable desde el punto de vista teórico, porque no solamente sirvió de fundamento a la moderna ciencia de la termodinámica, sino que le dio también su forma actual. Pero Carnot se cuidaba muy poco del aspecto teórico de su problema; porque para él fue un problema de economía industrial que

estudió como ingeniero práctico. Las máquinas de vapor, que por entonces estaban entrando en uso corriente, tenían que ser alimentadas con materias combustibles y hacían trabajo provechoso. Quiso saber Carnot cuánto trabajo podría obtenerse con determinado consumo de combustible, y, sobre todo, quiso saber cómo hacer que la suma de trabajo fuera un máximo. Consideró el trabajo en el aspecto de elevar un peso a cierta altura, y su estudio lo llevó al concepto de que el calor y el trabajo eran intercambiables.

JOULE (1818-1889). Las ideas de Carnot no ejercieron gran influencia en el progreso de la ciencia hasta que fueron captadas nuevamente por James Prescott Joule, de Manchester, discípulo de Dalton. Joule realizó una serie de experimentos ingeniosos sobre la relación entre el trabajo y el calor, midiendo la suma de calor engendrado por una suma de trabajo gastado, por ejemplo, en hacer dar vueltas al agua dentro de un recipiente. Definió su unidad de trabajo como *libra pie,* significando esto el trabajo hecho al levantar el peso de una libra a la altura de un pie, y su unidad de calor, la *caloría,* como el calor que es necesario para elevar en un grado una libra de agua, en la escala Fahrenheit. Entonces demostró que hay una relación constante entre las dos unidades, de suerte que una unidad de calor rinde siempre el mismo número definido de unidades de trabajo (número que ahora describimos como *equivalente mecánico del calor*).[22]

Debía de ser ya un lugar común que el calor y el trabajo eran intercambiables; Joule demostró experimentalmente que lo eran *en valor constante,* y determinó cuál era este valor. También podía el calor ser producido por otros agentes, como, por ejemplo, por energía eléctrica y energía radiante. Existe, asimismo, la energía cinética o de movimiento, que se medía ordinariamente como *vis viva* (p. 271), pero que Joule llamó *fuerza viva* y energía potencial, tal como la energía del peso de una pe-

sa de reloj elevada. Joule halló también que éstas eran intercambiables en valor constante, teniendo cada una su equivalente exacto en forma de calor o de trabajo. En 1847 anunció que:

> Los experimentos han demostrado que cuando una fuerza viva es *aparentemente* destruida, ya fuere por percusión, fricción o por otro medio cualquiera, devuelve calor en exacta equivalencia. La inversa es, asimismo, verdad [...] Calor, fuerza viva y atracción al través del espacio (a lo cual yo añadiría también la luz si ello fuera adaptable al plan de la presente conferencia) son mutuamente transformables. En estas transformaciones nada se pierde.[23]

No sólo jamás se pierde nada, sino que nada se ganó jamás, ya que todas estas transformaciones tuvieron lugar bajo valor constante en el cambio. Esto demostró con vivo resplandor por qué era imposible el movimiento continuo; todo sistema natural contenía una capacidad definida, pero limitada, para producir trabajo, mientras que el movimiento perpetuo exigía una capacidad indefinida e ilimitada.

El argumento es reversible. Si la experiencia demuestra que es imposible el movimiento continuo, esto debe significar que al efectuar un trabajo no se puede ganar ninguna fuerza de las transformaciones, y de aquí que todas las transformaciones se efectúen a valores constantes en el cambio. En 1847, el año mismo en que Joule anunció su conclusión general, el físico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894) publicó un pequeño folleto, *Erhaltung der Kraft,* en el cual expuso consideraciones de este género, y llegó a la misma conclusión que Joule: el calor y el trabajo eran intercambiables en proporción fija. Joule había comprobado que esto es así mediante experimentos directos, en tanto que Helmholtz había llegado a esta conclusión por argumentos abstractos basados en la imposibilidad del movimiento continuo.

Lord Kelvin (1824-1907). Por aquel mismo tiempo, sir William Thomson, después lord Kelvin, empezó a estudiar matemáticamente estas tesis, y a edificar sobre ellas un sólido cuerpo de conocimientos. Se había probado entonces que todo sis-

tema material tiene una reserva de calor, "fuerza viva", etc., que representa las capacidades para rendir trabajo, y que podían transformarse mutuamente con proporciones fijas en el cambio, permaneciendo el total invariable a través de todas las transformaciones, excepto en cuanto pudieran aumentarlo o disminuirlo agentes externos. Kelvin describió esto como *energía* palabra ya introducida en la física por Young.

El principio de Joule pudo entonces expresarse como conservación de la energía. Su primera enunciación del principio se había referido principalmente a las fuerzas mecánicas y de calor, pero demostró también que el principio se aplicaba igualmente a la energía eléctrica. En 1853, el químico Julius Thomsen halló que la energía se conserva de igual modo en las transformaciones químicas. De esta manera el amplio principio general de la conservación de la energía quedó establecido en la ciencia física, y constituyó un apropiado compañero de la conservación de la masa. La energía, como la masa, se consideró como suma total constante, resultando todos los cambios en el universo de redistribuciones de las reservas de energía y de masa que nunca cambian su cuantía total.

Lord Kelvin propuso entonces una escala exacta para las mediciones de energía o de calor. Aceptando que el calor era un movimiento al azar de las partículas de un cuerpo, propuso que las temperaturas se midieran desde un punto cero en el cual no hubiera movimiento alguno: el "cero absoluto" de temperatura. Ciertas consideraciones teóricas anticipadas por Carnot demostraron que esto mismo sucedería con todas las sustancias; los experimentos lo fijaron en −273 °C. Los termómetros habían dependido hasta entonces de la dilatación del mercurio, o cualquier otra sustancia especial, pero la nueva "escala absoluta" era independiente de las propiedades de sustancias especiales.

Entonces fue posible averiguar cómo deben funcionar las moléculas y los átomos de una sustancia para que la doten de sus propiedades físicas observadas.

El problema era más sencillo tratándose de un gas. Boyle intentó explicar su *resorte de aire* (p. 251) comparando el aire con "un conglomerado de pequeños cuerpos, unos sobre otros, a la manera de un vellón de lana. Porque éste consiste en muchos y flexibles pequeños filamentos, los cuales, igual que los resortes, pueden arrollarse, pero siempre tratarán de estirarse de nuevo".[24] Esto implicaba que las partículas de aire deben estar en contacto mutuo. Gassendi,[25] por otra, parte, había imaginado que éstas debían estar muy espaciadas, y mantenidas separadas por su movimiento. Un cuadro tal, pensó, explicaría todas las propiedades físicas de un gas.

Veinte años después Hooker expuso ideas semejantes, sugiriendo que la presión del aire resultaba de que las partículas duras, moviéndose rápidamente, chocan contra las paredes de la vasija cerrada. Intentó deducir la ley de Boyle, que dice: "Cuando varía el volumen de un gas, la presión cambia proporcionalmente a la densidad"; pero fracasó. Sesenta años después, Daniel Bernouilli (1700-1782), profesor de la Universidad de Basilea, demostró que la ley sería cierta si las partículas fueran de tamaño infinitesimal, y examinó al mismo tiempo cómo se alteraría la ley si las partículas fueran de tamaño apreciable.

Este punto permaneció intacto durante 100 años aproximadamente, y entonces revivió con gran vigor, estimulado por las investigaciones de Herapath (1821), Joule (1848), Krönig (1856), Clausius (1857) y Maxwell (1859).[26]

Joule calculó con qué rapidez deberían moverse las moléculas de un gas para producir la presión del gas observada por sus impactos, y halló que su velocidad en el aire ordinario debía ser

aproximadamente de 500 metros por segundo (poco más o menos la velocidad de una bala de fusil). En el aire caliente debían las moléculas, naturalmente, moverse con mayor velocidad y en el aire frío más lentamente. En general, la energía de movimiento por molécula es proporcional a la temperatura, medida en relación con el cero absoluto en el cual es nula la energía de movimiento.

Un estudio más riguroso de ésta y de otras cuestiones del mismo aspecto lo realizó J. R. E. Clausius, profesor de física en Bonn, en 1857. Comenzó estableciendo tres hipótesis simplificadoras; primera: que las moléculas de un gas se mueven todas con igual velocidad; segunda: que no ejercen fuerza alguna excepto cuando de hecho producen colisión, y tercera: que son de tamaño infinitesimal. Demostró entonces que la presión de un gas sería igual a los dos tercios de la energía de movimiento de todas las moléculas en la unidad de volumen del gas. La ley de Boyle quedaba explicada *ipso facto.* Porque si se dejaba al gas dilatarse hasta un volumen doble del que ocupaba al principio, la energía total del movimiento molecular permanecería invariable, y, por tanto, la energía por unidad de volumen quedaría reducida a la mitad. De aquí se deduce que la presión también se reduce a la mitad. Supongamos, no obstante, que el gas fuera calentado sin permitirle aumentar de volumen; entonces, la energía del movimiento molecular aumentaría proporcionalmente a la temperatura absoluta, de suerte que la presión debía ser, asimismo, proporcional a la temperatura absoluta. Ésta es la famosa ley de Charles y de Gay-Lussac, dada a conocer primero por Gay-Lussac (1778-1850), en 1802, aunque había sido descubierta experimentalmente por Charles (1746-1823), el aeronauta, hacia 1787.

Clausius probó también que las moléculas de gases diferentes deben moverse con velocidades diferentes, siendo la velocidad en cada gas inversamente proporcional a la raíz cuadrada

de su peso molecular; esta ley la descubrió Thomas Graham en 1846 mediante experimentos sobre la difusión de los gases a través de paredes porosas. Demostró también Clausius que la ley de Avogadro (p. 309) se deducía también como una consecuencia.

Las tres hipótesis simplificadoras de Clausius son todas ellas insostenibles. La hipótesis de que todas las moléculas de un gas se mueven con igual velocidad es imposible, porque las moléculas de un gas tienen que chocar unas con otras a intervalos frecuentes, y en cada colisión debe cambiar su velocidad, de suerte que, incluso si las velocidades fueran iguales en cualquier momento, muy pronto cesarían de serlo. En 1859, James Clerk Maxwell, entonces profesor de física en Aberdeen, después en Cambridge, se ocupó en este tema y trató de hallar cuál sería la velocidad media de las moléculas contando con el perturbador efecto de las colisiones, al mismo tiempo que averiguar cómo se distribuirían las velocidades de las moléculas individuales en torno de esta velocidad media. El resultado que obtuvo, conocido comúnmente como *ley de Maxwell,* se logró mediante aguda perspicacia matemática más que por riguroso análisis matemático. Nadie defiende hoy esta prueba suya, pero todo el mundo está de acuerdo en que conduce al resultado exacto. En fecha posterior (1887), el físico holandés Henrick Antoon Lorentz dio una prueba exacta, apoyada en un método que había presentado el profesor vienés Ludwig Boltzmann, en 1868.

La ley de Maxwell demuestra que la distribución de las velocidades es muy semejante a la distribución de los errores cuando unos tiradores apuntan al centro de un blanco. Naturalmente que debe de haber en esto alguna diferencia, puesto que el blanco es de estructura bidimensional, en tanto que el movimiento de las moléculas se verifica en tres dimensiones, pero ésta es la única diferencia acerca de tal hipótesis. Podemos re-

presentarnos las moléculas como tendiendo al reposo, y sus movimientos, que entonces se convierten en la medida de sus fracasos, se distribuyen con arreglo a la ley bien conocida de ensayo y error. Si la ley de Maxwell fuera exacta, sería un preliminar esencial para más importantes progresos.

El problema se había simplificado también mediante la hipótesis de que las moléculas ejercían fuerzas unas sobre otras únicamente en los momentos de choque. Maxwell descartó esta simplificación y suponía que las moléculas ejercen fuerzas repulsivas mutuamente, incluso cuando no están en contacto; estas fuerzas se suponía que existían a todas las distancias, pero eran insignificantes excepto a distancias muy cortas. Suponía Maxwell que su intensidad disminuía en razón inversa a la quinta potencia de la distancia, habiéndole llevado ciertos experimentos a pensar que ésta era la verdadera ley de la fuerza molecular. De acuerdo con esta hipótesis, estudió varias propiedades de los gases, especialmente sobre conducción del calor, difusión y fricción interna o viscosidad. Cierto número de matemáticos, especialmente Chapman, Enskog, Lennard-Jones y Cowling, extendieron recientemente su obra en varias direcciones y en busca de otras leyes de las fuerzas.

Es igualmente imposible suponer que las moléculas de un gas son infinitamente pequeñas. Las tres propiedades de un gas mencionadas hace un momento son todas consecuencia de que sus moléculas son de magnitud finita, y su importancia depende de su magnitud; cuanto más pequeñas son las moléculas, más lejos se propagan sin choques, y de esta suerte penetran más en las capas de gas contiguas. De esta manera, estos fenómenos proporcionan el medio de determinar la magnitud de las moléculas. Se ha llegado a saber que la molécula media tiene un diámetro aproximado de una cien millonésima de pulgada (254 mil millonésimas de milímetro). En el aire ordinario se propaga a 1/400 000 de pulgada (63.5 millonésimas de milíme-

tro) en cada uno de los sucesivos choques, e invierte la 8 000 millonésima parte de un segundo en propagarse por cada uno de sus espacios libres. La hipótesis de Maxwell de que las moléculas se repelen a todas las distancias es, sin embargo, incompatible con los fenómenos de la atracción capilar y tensión superficial de los fluidos.

En 1873, el físico holandés Van der Waals descartó esta hipótesis, y supuso que las moléculas habían de estar sumamente próximas para atraerse mutuamente. Investigó cómo se comportaría una sustancia bajo tales condiciones y halló que sería capaz de existir en tres estados distintos, que inmediatamente identificó con los líquidos, vapores y gases. Su investigación dio, asimismo, explicación convincente de ciertos resultados obtenidos por Andrews en 1869 y en 1876. Hasta entonces se había supuesto que todo gas podía pasar al estado líquido mediante suficiente compresión. Andrews encontró que no es así; cada gas tiene su propia "temperatura crítica", y en tanto que permanezca sobre ella, ninguna presión, de cualquier magnitud que fuere, puede licuarlo. Estos experimentos, y la teoría de Van der Waals para explicarlos, habían conducido a una complicada técnica para la licuefacción de los gases y las varias extensas aplicaciones de la refrigeración. Antes de finalizar el siglo XIX, todos los gases comunes pudieron llevarse al estado líquido, excepto el helio. El físico de Leiden Kamerlingh Onnes lo licuó en 1908; su temperatura crítica es de −268 °C, esto es 5 °C sobre el cero absoluto.

Electricidad

Por muy importantes que fueran todos estos progresos, los dos siglos de los cuales estamos tratando ahora fueron aún más dignos de contarse por el vasto y rápido desarrollo de las ciencias de la electricidad y el magnetismo. Vieron la inauguración

de la edad eléctrica, y la introducción de la electricidad en la vida común.

Las bases de estas ciencias modernas se establecieron en 1600, con la publicación de Gilbert de la obra *De magnete* (p. 179). Principalmente trata del magnetismo, y dedica sólo un capítulo a la electricidad. Esta desproporción era natural en aquel tiempo, por dos razones. En primer lugar, el magnetismo tenía un valor práctico en la ciencia náutica. La brújula del marino (un pequeño imán sobre un pivote) la inventaron los chinos en el siglo XI y la trajeron a Europa los marinos mahometanos;[27] desde entonces se vino haciendo común uso de ella. La electricidad no tuvo aplicaciones tan útiles. En segundo lugar, los fenómenos de magnetismo eran muy ampliamente conocidos, y fácilmente se ponían de manifiesto; cualquiera podía llevar una pequeña piedra imán en el bolsillo, en tanto que los efectos eléctricos no se demostraban con tanta facilidad.

Gilbert halló el tema del magnetismo impregnado de superstición; se atribuían a la piedra imán poderes mágicos para curar enfermedades, que perdían si se manchaban de ajo; y así por el estilo. Gilbert hizo caso omiso de todo esto y comenzó con un estudio experimental de la atracción de la piedra imán que le guió para describir la Tierra como un imán enorme.

La electricidad presentaba un cuadro un tanto diferente. Se sabía desde la Antigüedad que cuando un trozo de ámbar se frotaba de cierta manera adquiría el poder de atraer objetos ligeros, y Gilbert lo explicó diciendo que la electricidad (la propiedad eléctrica: ἤλεκΤρον = ámbar) residía en el objeto frotado. Gilbert comenzó por construir un burdo electroscopio, que era simplemente una ligera aguja de metal que podía girar horizontalmente sobre un pivote; una especie de brújula náutica. Este instrumento podía al mismo tiempo acusar la presencia de la electricidad, y dar una tosca indicación de su cuantía. Frotó diversas sustancias y examinó sus efectos sobre esta aguja gira-

toria. Halló que las sustancias se separaban en dos diferentes clases. Unas, como el vidrio, el azufre y la resina, se asemejaban al ámbar en que atraían la aguja después de frotadas; pero otras, como el cobre y la plata, no presentaban ninguna fuerza de atracción. Llamó a las sustancias del primer tipo *eléctricas* y a las del segundo *aneléctricas*. Los aneléctricos de Gilbert eran las sustancias que hoy llamamos *conductoras;* la electricidad pasa libremente por ellas, de suerte que no pueden retener una carga de electricidad sino durante una mínima fracción de segundo. Los eléctricos de Gilbert eran, naturalmente, nuestros aisladores; la electricidad no pasa libremente a través de éstos, de suerte que puede almacenarse en ellos. También puede almacenarse en conductores si se ponen aisladores que bloqueen su punto de escape; de otro modo, intentar almacenar electricidad en cuerpos conductores es igual que querer llenar de agua una criba. Pero como Gilbert no sabía esto, no aisló su electroscopio y, por tanto, no pudo jamás observar la repulsión de las cargas eléctricas. El primero que observó esto fue Cabaeus, en 1629,[28] cuando vio que los filamentos de metal que atraía el ámbar frotado con frecuencia saltaban hasta varias pulgadas desde el ámbar después de haber tenido contacto con él. En 1672, Otto de Guericke, el inventor de la máquina neumática, presentó el mismo fenómeno de manera muy chocante.[29] Montó una esfera de azufre sobre un eje de hierro, dio vueltas a éste con una mano mientras que con la otra frotaba la esfera, electrificándola así bastante vigorosamente. Los cuerpos ligeros y pequeños, como plumas, por ejemplo, saltaban entonces entre el azufre y el pavimento a medida que alternativamente la electricidad de la esfera los atraía o los repelía. Unos pocos años después, Isaac Newton presentó un experimento similar ante la Royal Society, generando electricidad mediante el frotamiento del vidrio con seda.

En 1730, C. F. du Fay intentó explicar estas atracciones y repulsiones con la hipótesis de que todas las sustancias contenían dos géneros de fluido eléctrico. Estos se hallaban de ordinario presentes en cantidades iguales, y entonces se neutralizaban mutuamente; por esta razón los llamó electricidad positiva y electricidad negativa. Mas podían separarse mediante la fricción, y entonces se atraían o repelían mutuamente según fueran de diferente signo o del mismo. El famoso estadunidense Benjamin Franklin (1706-1790), entonces impresor en Filadelfia, expuso que las atracciones y repulsiones se explicaban mejor suponiendo que en todos los cuerpos había un solo *fuego eléctrico* o *fluido eléctrico*. Un cuerpo que contiene más fluido que el que normalmente le corresponde, se dice de él que está cargado en exceso o, mejor dicho, que está cargado positivamente, en tanto que el que contiene menor cantidad que la normal está menos cargado, o cargado negativamente. De esta suerte, prevaleció durante más de un siglo la explicación de los fenómenos eléctricos por medio de un fluido; pero la explicación antigua de los dos fluidos se adapta mejor a nuestro conocimiento actual. Poco más progreso podía conseguirse sin una técnica mejor para el manejo y acumulación de la electricidad. Hacia 1731 se encontró que la electricidad podía transmitirse de un cuerpo a otro montando un conductor que los conectara, y en 1745 hallaron independientemente Musschenbrock, en Leiden, y Van Kleist, en Kummin, que la electricidad podía almacenarse en cantidad en un "condensador" formado por dos placas conductoras que tuvieran una lámina de material aislante entre ellas: la botella de Leiden, denominada así por el nombre de la ciudad en que se inventó.

En 1749 Franklin sugirió que el rayo era efecto de la conducción eléctrica, y lo confirmó en 1752 mediante un doloroso experimento en el cual la chispa bajaba desde una cometa volando a gran altura hasta una llave que tenía Franklin en la ma-

no. Propuso que se protegieran los edificios contra los efectos destructores del rayo por medio de “conductores del rayo” o pararrayos, barras de metal que conducirían el rayo a tierra sin hacer daño alguno.

En 1767, Priestley escribió una *Historia y estado actual de la electricidad,* en la cual describía y examinaba todo el conocimiento eléctrico de su época. Franklin echó una vez sobre una copa de metal muy electrizada pequeñas esferillas de corcho, y observó que ni se atraían ni se repelían. Priestley repitió estos experimentos en 1766 y, además, probó que no había carga en el interior de un conductor electrizado. Si, por ejemplo, una esfera hueca de materia conductora tiene una pequeña abertura en su superficie, podría esperarse que, si la esfera estaba electrizada, podría salir impulsada alguna carga por la abertura. En realidad, resulta imposible, porque no hay en el interior ninguna carga que impulsar; toda la carga reside en la superficie exterior de la esfera. Comparando esto con un teorema matemático de Newton, por el cual se demostraba que no existe ninguna fuerza gravitatoria en el interior de una esfera hueca, dedujo Priestley que la ley que rige las fuerzas entre cargas eléctricas debe ser la misma ley de la gravitación, especialmente la de la inversa del cuadrado de las distancias. Cavendish obtuvo una confirmación experimental directa de esta ley en 1771, pero sus resultados no se publicaron hasta 1779. Entretanto, el ingeniero francés Charles Augustus Coulomb (1736-1806) la había confirmado también en 1785 midiendo directamente las fuerzas requeridas para mantener separadas dos esferillas de médula de saúco electrizadas en una serie de medidas de la distancia que las separaba.

Partiendo de este resultado, procedió Coulomb a edificar una teoría matemática de la fuerza eléctrica. Su obra la continuó una sucesión de teóricos todavía más distinguidos, incluyendo al gran matemático francés Simeon Denis Poisson

(1781-1840), y el igualmente eminente matemático alemán Karl Friedrich Gauss (1777-1855).

La corriente eléctrica. A fines del siglo xviii la ciencia de las cargas eléctricas en reposo (electrostática, como ahora se llama) ya estaba muy cerca de su forma actual; no se le añadió nada de importancia fundamental hasta que apareció en escena el electrón, aproximadamente un siglo más tarde. Pero se estaban abriendo nuevos caminos gracias al descubrimiento de la corriente eléctrica: cargas eléctricas en movimiento.

Como otros muchos descubrimientos fundamentales de la física, éste fue casi accidental. Hacia 1773 los físicos se interesaban por las sacudidas producidas por los llamados peces "eléctricos", el *torpedo* y el *gimnoto.* Como estas sacudidas se parecían mucho a las recibidas por la descarga de una botella de Leiden se presumió que eran de origen eléctrico, y esto invitó al estudio de los aspectos biológicos de la electricidad. En 1793, el italiano Luigi Galvani, de Bolonia, hizo pasar la descarga de una botella de Leiden por el anca de una rana y observó que producía contracciones espasmódicas de los músculos. Imaginó al mismo tiempo que había demostrado que las contracciones musculares podían producir fenómenos eléctricos, lo que es verdad, pero no lo comprobó. Atribuyó estos efectos a lo que él llamó *electricidad animal,* pero que otros individuos llamaron *galvanismo*.

En 1800, Alessandro Volta, de Pavía (1745-1827), probó que la actividad eléctrica podía estimular los órganos del tacto, gusto y visión, ocasionando de este modo una variedad de sensaciones corporales. Por ejemplo, si dos monedas de metales diferentes se colocaban, una encima y la otra debajo de la lengua, y sus dos superficies se ponían en comunicación por medio de un hilo metálico, la lengua experimentaba un sabor salado. Lo atribuyó a la electricidad animal, porque imaginó que dependía de la presencia de materia viva: la lengua. Mas pronto

halló que los efectos eléctricos seguían produciéndose cuando se remplazaba la lengua con un cartón grueso empapado en salmuera. Entonces construyó una *pila de Volta,* en la cual se colocaban capas de zinc, papel, cobre, zinc, papel, cobre…, cobre, unas sobre otras hasta cierto número, pero siempre en este orden, empezando con zinc y terminando en cobre. Si entonces se unía el zinc de la base con el último cobre de arriba, resultaba que había electricidad fluyendo continuamente por el hilo de unión. Este sencillo aparato fue el prototipo de las pilas eléctricas y de los acumuladores, y toda corriente eléctrica fue producida por medios análogos hasta que posteriormente entró en escena la dinamo.

En 1801 Wollaston demostró que la electricidad generada de esta manera producía exactamente los mismos efectos que la electricidad animal de Galvani. En el año siguiente, Erman empleó un electroscopio para medir el grado de electrización producido por pilas de Volta, y halló que una pila con gran número de capas producía sólo el mismo grado de electrización que un frotamiento muy pequeño.

En este tiempo se describía ordinariamente la electricidad de la pila voltaica como electricidad en movimiento y la producida por frotamiento como electricidad en tensión. Después, en 1827, Georg Simon Ohm (1781-1845) remplazó estas vagas descripciones por una terminología más exacta y científica. Comparando la corriente eléctrica con una corriente de agua, la corriente de electricidad en una máquina de frotamiento es como la de una catarata, en la cual una pequeña cantidad de agua cae desde gran altura, mientras que la corriente que se produce conectando el hilo de una pila voltaica es como la corriente de un anchuroso río en el cual una vasta masa de agua experimenta muy poca caída. La corriente continua que recorre un circuito es como la corriente de agua en un canal circular que desciende por todas partes, excepto en el punto en que

una estación elevadora, por medio de bombas, eleva el agua a su nivel original. La estación elevadora puede ser una pila de Volta o una batería de pilas o de acumuladores o incluso una dinamo. Ohm llevó la precisión a las ideas de cantidad de electricidad, intensidad de la corriente y fuerza electromotriz. Una cantidad de electricidad corresponde a una cantidad de agua en el símil que hemos empleado, y una corriente eléctrica corresponde a la corriente de nuestro canal (la cantidad de agua que pasa por un punto determinado en la unidad de tiempo), en tanto que la fuerza electromotriz (o voltaje) representa la altura desde la cual cae el río; estrictamente se define por la suma de trabajo que debe efectuarse para transmitir la unidad de cantidad de electricidad por el circuito, o más generalmente, desde un punto a otro de este circuito.

Electroquímica. En el mismo año de 1800, en que Volta construyó su primera pila, dos ingleses, Nicholson y Carlisle, le introdujeron una modificación que produjo importantísimas consecuencias. No conectaron directamente el primer zinc con el último cobre con un solo hilo, sino que empalmaron un hilo de latón a cada uno de ellos y sumergieron los dos extremos sueltos en un recipiente de agua salada; pusieron sal al agua para hacerla buena conductora de la electricidad. En vez de pasar por el simple hilo de Volta, la corriente de electricidad pasaba entonces a través de los dos hilos de latón y del agua, y, a medida que esto ocurría, se encontraba hidrógeno acumulado en el extremo de uno de los hilos, en tanto que el extremo del otro hilo se oxidaba. Ahora bien, si los hilos eran de sustancia inoxidable, el oxígeno se acumulaba en el extremo de un hilo y el hidrógeno en el extremo del otro. De manera evidente, el paso de la electricidad había descompuesto el agua en sus dos constituyentes, oxígeno e hidrógeno.

De este experimento fundamental surgió el desarrollo de todo lo que es electroquímica. Además del agua, de modo análogo

se descompusieron otras sustancias en sus constituyentes fundamentales, y por este procedimiento se descubrieron; así, sir Humphrey Davy (1778-1829) descubrió el sodio y el potasio en 1807.

En el experimento original de Nicholson y Carlisle, la suma de oxígeno y de hidrógeno que quedaba libre sería evidentemente proporcional a la cantidad de corriente que atravesaba el agua. En 1833, Faraday (p. 328) midió cuánta electricidad se necesitaba para liberar por medio de la corriente un gramo de varias sustancias determinadas, y halló que la cuantía estaba íntimamente relacionada con el peso atómico de la sustancia. Pero estaba incluso más íntimamente relacionada con el número de átomos que liberaba, y esto, como hizo observar posteriormente Helmholtz, denunciaba la existencia de una unidad fundamental de carga eléctrica asociada a cada átomo; aquí se vislumbró el electrón.

De esta suerte es fácil medir la cantidad de sustancia liberada por una corriente eléctrica, y el procedimiento se empleó durante largo tiempo para la medición práctica de la corriente eléctrica, y se usa todavía para definir la unidad de corriente. Esta unidad, el *amperio,* se define como la corriente que deposita plata a razón de 0.0011183 de gramo por segundo.

Faraday introdujo en la electroquímica la mayor parte de su terminología actual. El procedimiento para descomponer una sustancia en sus constituyentes más simples por medio de la corriente eléctrica se ha llamado *electrólisis* (desatado eléctrico), y la sustancia descompuesta se denomina *electrólito*. Las dos placas sumergidas en el electrólito se llamaron *ánodo* y *cátodo* la corriente de electricidad positiva va desde el primero al segundo. Los dos constituyentes de una sustancia descompuesta se llamaron *anión* y *catión,* respectivamente, o podían calificarse conjuntamente como *iones*.

De esta manera se enlazó la electricidad con la química, e igualmente se asoció con otras ramas de la física. El paso de la electricidad a lo largo de un conductor produce, según se descubrió, calor, y algunas veces también luz, causa por la cual la electricidad quedaba enlazada con la luz y el calor, y se pusieron los cimientos de las modernas tecnologías sobre calefacción y alumbrado por electricidad. Pero una conexión más fructífera se había de establecer en breve: la de la electricidad con el magnetismo.

Electromagnetismo. Muchos observadores habían notado que el magnetismo de las agujas podía ser afectado por las descargas eléctricas producidas en su proximidad, y dedujeron que debía de existir algún lazo entre la electricidad y el magnetismo. El primer contacto definido se estableció en 1820, cuando el profesor H. C. Oersted, de Copenhague, descubrió que una aguja magnética en equilibrio sobre un pivote o colgada de un hilo se apartaba de su posición inicial cuando pasaba próxima a ella una corriente eléctrica. De esta simple observación salió toda la tecnología del telégrafo eléctrico: el martilleo de un "manipulador telegráfico" intercalado en una corriente eléctrica, restablece o interrumpe alternativamente la corriente en el circuito, y de esta suerte produce una sucesión de inclinaciones en una aguja magnética situada en el lejano extremo del circuito, posiblemente a cientos de kilómetros, y éstas pueden interpretarse de acuerdo con un código previamente convenido. La misma observación permitió medir la intensidad de una corriente eléctrica por medio del instrumento llamado *galvanómetro*. En su forma más sencilla, consiste en una aguja magnética suspendida o apoyada en un pivote de manera que pueda girar libremente, y está rodeada por un carrete de hilo metálico que forma parte de un circuito eléctrico. El carrete contiene muchas vueltas de hilo, de suerte que incluso una corriente débil pasando por el carrete produce en la aguja una desviación

susceptible de medirse, y la cuantía de la desviación da la medida de la cuantía de la corriente.

El físico francés André Marie Ampère vio inmediatamente que el descubrimiento de Oersted podía tener consecuencias de gran alcance. Se sabía corrientemente que dos imanes *A* y *B* que están próximos producen desviación mutua, y Oersted acababa de demostrar que el imán *A* podía sustituirse por una corriente eléctrica. ¿Por qué no había de ser posible remplazar también el imán *B* por una corriente eléctrica? Más brevemente: una corriente parecía ser equivalente a un imán; ¿por qué no habían de ser equivalentes dos corrientes a dos imanes, caso en el cual dos corrientes se desviarían mutuamente como lo hacían dos imanes? El 21 de julio de 1820, exactamente una semana después de que la noticia del descubrimiento de Oersted llegara a París, Ampère hizo el experimento y obtuvo el resultado que había previsto: dos corrientes se atraen o se repelen mutuamente igual que dos imanes.

Fue éste un gran resultado; pero era únicamente un escalón para llegar a un descubrimiento más avanzado que hizo Faraday, uno de los más grandes experimentadores que ha tenido jamás la ciencia.

Michael Faraday (1791-1867) nació en Newington Butts, Londres, el 22 de septiembre de 1791, hijo de un forjador con una familia de 10 hijos. Comenzó su vida como mandadero de un encuadernador, con el cual fue más tarde aprendiz. Estando empleado de aquella suerte, un parroquiano le dio billetes de entrada a algunas conferencias científicas que estaba dando sir Humphrey Davy en la Royal Institution. Allí llamó la atención de sir Humphrey y finalmente fue nombrado su conferenciante auxiliar, escapando así del comercio, que le repugnaba, para practicar su amor a la ciencia.

Por consiguiente, se familiarizó con los fenómenos de la inducción eléctrica. Cuando un cuerpo electrizado, por ejemplo, un trozo de ámbar, se aproxima a un cuerpo no electrizado, las fuerzas de aquel cuerpo producen la separación de las dos clases de electricidad en el que no estaba electrizado; la parte más alejada se carga de electricidad del mismo signo que la del ámbar, y la más próxima se carga con electricidad de signo contrario; por esto el ámbar frotado atrae ligeros trozos de papel o la aguja de un electroscopio. Faraday sabía asimismo que si un imán se aproxima a un trozo de hierro no imantado, induce magnetismo en este trozo de hierro, de suerte que el hierro y el imán se atraen; ésta es la razón de que un imán recoja las limaduras de hierro.

Faraday, concediendo importancia a estos hechos, se preguntó si al propagarse por un circuito una corriente no podría, igualmente, inducir otra corriente en un circuito próximo. Con imanes, la inducción se producía; ¿por qué no había de ocurrir lo mismo con las corrientes que aparecían tan aproximadamente equivalentes a los imanes? Hacia el año 1821, y de allí en adelante, trató, sin éxito, de inducir una corriente en un circuito por medio de un imán o por medio de otra corriente en otro circuito. Finalmente, en agosto de 1831, arrolló 203 pies de hilo de cobre alrededor de un grueso cilindro de madera, e intercaló otros 203 pies de hilo semejante, en espiral, entre las vueltas del anterior, y evitando el escape eléctrico entre los dos hilos mediante una envoltura de bramante en ambos. Los extremos de uno de estos hilos se conectaban con un galvanómetro y los extremos del otro con una pila de 100 pares de placas. Esto le proporcionó dos circuitos sumamente próximos, con facilidad para hacer pasar una corriente por uno de ellos y observar la corriente que pasara por el otro. Si el paso de la corriente en el primer circuito inducía una corriente en el segundo, el galvanómetro intercalado en este último tenía que desviarse. Al

principio, con gran desaliento, no pudo observar ninguna corriente. Por último, notó un ligero movimiento instantáneo del galvanómetro del segundo circuito, exactamente en el instante de comenzar el paso de la corriente en el primer circuito. Un movimiento semejante ocurría en dirección contraria cuando cesaba la corriente.

Entonces se reveló el secreto. Una corriente constante propagándose por el primer circuito no inducía corriente alguna en el segundo; pero sí producían corriente inducida los cambios de ella. Una vez establecido esto, faltaba sólo un paso más para ver si la corriente del primer circuito podía sustituirse por un imán, y pronto halló Faraday que el movimiento de un imán en la proximidad de un circuito inducía en éste una corriente.

De esta suerte resultaba que el trabajo mecánico empleado en mover un imán podía transformarse en corriente eléctrica. Se había encontrado la manera de convertir la energía mecánica en la energía de una corriente eléctrica. En mayor escala podía mover el imán una máquina alimentada por la hulla, y así se transformaría en corriente eléctrica la energía del calor de la hulla ardiendo. La ciencia de la ingeniería eléctrica acababa de nacer.

De este experimento fundamental de Faraday se ha desarrollado toda la vasta técnica de la producción mecánica de la energía eléctrica, y de la estructura y operación de las dinamos. El procedimiento inverso de transformar la energía de una corriente eléctrica en energía mecánica sirve de base a los motores eléctricos y a todas las formas de transporte eléctrico: trenes, tranvías, ascensores, y así sucesivamente.

El mismo experimento fundamental sirve de base a la nueva teoría matemática del electromagnetismo, que se desarrolló inmediatamente después. Tratando de explicar Faraday su experimento adoptó el mismo concepto *líneas de fuerza* empleado

por Gilbert en su *De magnete,* suponiendo que los imanes o las cargas eléctricas o una corriente producían fuerzas en el éter que se suponía llenaba el espacio. Si se pone una tarjeta de cartulina sobre los extremos de un imán en forma de herradura y se derraman limaduras de hierro encima de la tarjeta, las limaduras se agrupan en cadenas que van aproximadamente de un polo al otro del imán. Faraday imaginó que esto no sólo acusaba la existencia de fuerzas magnéticas en el éter, sino que marcaba las direcciones en que actuaban dichas fuerzas sobre la cartulina. Supuso que debía de haber semejantes líneas de fuerza eléctrica en la proximidad de las cargas eléctricas. Por consiguiente, el éter mismo se debía de hallar en estado de presión o tensión, y sus empujes y tirones explicarían naturalmente las atracciones y las repulsiones de los imanes y de los cuerpos cargados eléctricamente. Faraday podía entonces explicar su experimento fundamental mediante la hipótesis de que un imán en movimiento lleva consigo sus líneas de fuerza magnética, y que si éstas atraviesan un circuito eléctrico producen en éste una corriente eléctrica que se propaga por él.

Faraday no pensó en interpretar su concepto *líneas de fuerza* de manera muy realista, sino únicamente como un diseño para ayudar a que la inteligencia captara el modo de actuar de las fuerzas eléctrica y magnética. Sus ideas se habrían expresado mejor, evidentemente, en términos matemáticos; pero Faraday no era matemático. Clerk Maxwell, por otra parte, lo era, y en 1856 publicó un escrito titulado *Sobre las líneas de fuerza de Faraday,* en el cual quiso expresar las ideas de Faraday en lenguaje matemático exacto. Siguió a Faraday en atribuir la acción eléctrica y magnética a presiones y tensiones en el éter, y en 1864 demostró que toda perturbación producida en el éter por cambios eléctricos o magnéticos se propaga a través de éste en forma de ondas. En tales ondas, las fuerzas eléctricas y magnéticas

estarían entre sí en ángulo recto, e igualmente a la dirección en que las ondas se propaguen.

Estas ondas deberían propagarse a velocidad uniforme, que podría calcularse y probarse, dentro de los límites de error experimental, que es exactamente igual a la velocidad de la luz. En Gran Bretaña, por lo menos, esto se adoptó generalmente para establecer que la luz era un fenómeno electromagnético, consistente en ondas de fuerza eléctrica y magnética que se propagan por el éter. La pregunta "¿qué es la luz?", que no halló solución a través de las épocas, podía al fin contestarse; la luz era el paso de las fuerzas electromagnéticas a través del éter.

En el continente, sin embargo, no quedaron convencidos del todo. En 1879 la Academia de Berlín ofreció un premio por un tema que contuviera algo de aquella cuestión. Helmholtz, entonces profesor de física en Berlín, se lo dijo a Heinrich Hertz (1857-1894), que entonces era uno de sus alumnos, y que más tarde fue profesor en Karlsruhe y en Bonn. Esto tuvo por resultado que en el año de 1887 consiguiera Hertz, en su laboratorio, que unos generadores de electricidad emitieran oscilaciones exactamente del género predicho por la teoría de Maxwell, y se demostró que poseían todas las propiedades que les atribuyera esta teoría, así como las propiedades conocidas de las ondas luminosas, excepto que eran de longitud de onda mucho mayor. En verdad eran lo que hoy llamamos radio-ondas de longitud de onda muy corta. De estas investigaciones de Faraday y de Maxwell y de los precursores experimentos de Hertz se ha desarrollado la actual vasta técnica de la radiotransmisión.

Tras estos experimentos de Hertz, el continente siguió a la Gran Bretaña en la aceptación de la teoría electromagnética de la luz.

Hertz demostró, además, que las leyes electromagnéticas de Maxwell implicaban una simetría esencial entre la acción eléctrica y la magnética. Todo cambio en un campo de fuerza eléctrico producía fuerzas magnéticas; todo cambio en un campo de fuerza magnético producía ondas eléctricas; y las leyes matemáticas que relacionaban el cambio con las nuevas fuerzas eran las mismas en los dos casos. Fue éste un descubrimiento de la mayor importancia para los posteriores estudios referentes a la definitiva significación de la electricidad y del magnetismo.

VIII
LA ERA DE LA FÍSICA MODERNA
(1887-1946)

Los dos siglos transcurridos desde 1687 a 1887 pueden describirse propiamente como la edad mecánica de la física. La ciencia parecía haber descubierto que vivimos en un mundo mecánico, un mundo de partículas que se mueven como la fuerza de las demás partículas las obligan a moverse, un mundo en el cual el futuro está completamente determinado por el pasado. En 1687, los *Principia* de Newton habían interpretado con buen éxito el universo astronómico de esta manera. Antes de 1887 había interpretado Maxwell la radiación de manera esencialmente semejante, diciendo que consistía en perturbaciones que se propagaban a través de un éter sujeto a leyes mecánicas. Finalmente, en 1887 Hertz produjo radiación de tipo maxwelliano emanada de fuentes de electricidad en el laboratorio, y demostró su semejanza con la luz ordinaria. Pareció que esto proporcionaba la clave final al edificio levantado en los dos siglos precedentes.

La mayor parte de los físicos pensó tal edificio como cuadrangular, completo e inalterable. Era difícil imaginarse a los físicos del futuro ocupados en otra cosa que no fuera poner puntos sobre las íes y el travesaño en las tes de la explicación mecánica del universo, y expresar la medida de las cantidades físicas con mayor número de cifras decimales.

Nadie habría podido imaginar cuán diferente había de ser el verdadero curso de los acontecimientos. Sin embargo, en el año de 1887, en el cual se había provisto de una clave al edificio, al mismo tiempo se percibió que empezaba a tambalearse visiblemente; fue el año del famoso experimento Michelson-Morley,

el cual demostró desde el principio que había alguna falla en los cimientos. Esto fue, como podemos ver, la culminación de la edad mecánica en la física y la inauguración de una era no mecánica.

Tal cosa no significa que la ciencia siguiera durante dos siglos un camino totalmente equivocado. Por lo menos, había descubierto un sistema de leyes que describían perfecta o casi perfectamente los movimientos de los planetas y de los proyectiles, de la caída de los cuerpos y de la rotación de las esferas; había demostrado que los objetos de moderada magnitud se comportaban, en general, de modo completamente mecánico, todo lo cual constituía un sólido progreso. Pero la ciencia estaba ahora comenzando a investigar la naturaleza bajo una categoría de condiciones de mucho mayor amplitud. El estudio de lo muy grande y de lo muy pequeño pudo, de manera fácil de concebir, mostrar que aún era adecuada una descripción mecánica, incluso en regiones que permanecían muy remotas de la directa experiencia humana; en verdad, lo que mostraba era el reverso: en conjunto, el panorama tenía necesidad de radical enmienda. La historia de la física desde el año 1887 consiste en gran parte en la narración de esta enmienda o rectificación.

Espacio absoluto. La primera gran rectificación por hacer era borrar del panorama el espacio absoluto que había expuesto Newton como armazón de su sistema. El éter, que presentaba un fondo despejado al panorama en su conjunto, se creyó que servía a un doble propósito: proporcionaba un fondo sobre el cual podían medirse las distancias en el espacio y transmitía la radiación en forma de ondas electromagnéticas. Pero no había prueba ninguna experimental de su existencia; era puramente hipotético. Michelson y Morley idearon un experimento para ponerse en más estrecha relación con dicho éter fugaz, en particular para medir la velocidad del movimiento de la Tierra a través de él.

Se suponía que la luz se propagaba a través del éter a la velocidad uniforme de 186 300 millas (unos 300 000 kilómetros) por segundo, que es lo que se llama *velocidad de la luz*. Pero esta velocidad puede parecer diferente a un observador que se halle sobre la Tierra en movimiento. Si ésta se moviera a través del éter en el mismo sentido que la luz, a una velocidad de x kilómetros por segundo, resultaría, después de un segundo, que la luz habría recorrido, *a través del éter,* 300 000 kilómetros; mas, como la Tierra habría avanzado recorriendo x kilómetros también a través del éter, la luz se hallaría en tal momento a 300 000 – x kilómetros *delante de la Tierra.* De esta suerte, la aparente velocidad de propagación de la luz (verdadera velocidad respecto de la Tierra) sería nada más que de 300 000 – x kilómetros por segundo. Si la luz avanzara en sentido opuesto a la Tierra, su velocidad relativa sería de 300 000 + x kilómetros por segundo. Supongamos ahora que se envía un rayo de luz desde una fuente de luz terrestre, propagándose en la misma dirección que la Tierra hasta que choca con un espejo que la refleja y la hace regresar a su origen. A la ida viajaría a 300 000 – x kilómetros por segundo, y a la vuelta a 300 000 + x kilómetros por segundo. Una sencilla operación aritmética demuestra que la doble jornada invertiría ligeramente algo más tiempo que si la Tierra estuviera en reposo respecto del éter,[1] y que, cuanto más rápidamente se moviera la Tierra, mayor sería la pérdida de tiempo. De esta manera, por la cantidad de tiempo perdido, según la observación, debe ser posible, en principio, determinar la velocidad x del movimiento de la Tierra.

El experimento Michelson-Morley. Realizar el experimento en la sencilla forma que acabamos de describir, naturalmente, es por completo imposible; se necesitarían cronómetros de precisión increíble. Pero en el año de 1887 los dos profesores estadunidenses Michelson y Morley idearon una variante que parecía practicable, y que probablemente daría la información deseada.

Hicieron que un haz de luz se dividiera en dos mitades, una de ellas destinada a hacer los trayectos de ida y vuelta del género que hemos descrito hace un instante, mientras que la otra, actuando como una especie de testigo, ejecutaba un doble trayecto de ida y vuelta de igual longitud, pero en ángulos rectos. Cuando las dos mitades del haz de luz volvían a su punto de origen, se las reunía y pasaban a través de un pequeño telescopio.

Si la Tierra estuviera en reposo en el éter, entonces, naturalmente, los dos haces de luz tardarían el mismo tiempo en realizar sus respectivos viajes; si comenzaron juntos, asimismo juntos regresarían al punto de origen. Mas, si la Tierra estuviera en movimiento, los tiempos invertidos en estos viajes serían ligeramente diferentes, y la diferencia podría mostrarse por interferencia (p. 290). La magnitud de la diferencia observada debía en tal caso acusar la velocidad del movimiento de la Tierra. Era tan sensible el método, que se podía observar una velocidad menor a un kilómetro por segundo.

Con tales esperanzas se proyectó y ejecutó el experimento. Mas no fue posible captar ninguna diferencia de tiempo; las cosas ocurrían exactamente igual que si la Tierra permaneciera inmóvil en el éter. Naturalmente que la Tierra podía haber estado en reposo en el momento del experimento, porque su movimiento de 30.5 kilómetros por segundo en su revolución alrededor del Sol podía neutralizarlo exactamente un movimiento del Sol de 30.5 kilómetros por segundo en sentido opuesto a través del espacio. Si así fuera, no había sino que esperar seis meses, y la Tierra estaría entonces moviéndose en el espacio a la velocidad de 61 kilómetros por segundo. Mas el mismo resultado se obtuvo precisamente cuando se repitió el experimento seis meses más tarde, y en varias ocasiones sucesivas; parecía, pues, que la Tierra estaba siempre inmóvil en el éter. Podía pensarse que la Tierra arrastrara consigo el éter si no se

hubiera excluido esta posibilidad por el fenómeno de la aberración (p. 279); éste requería, de manera precisa, que la Tierra se moviera libremente a través del éter.

Durante algún tiempo pareció esta situación un completo misterio. Se aclaró cuando se propuso la solución independiente y casi simultáneamente por Lorentz de Haarlem (p. 316) y George Francis Fitzgerald (1851-1901), de Dublín. Los dos medios haces de luz habían empleado el mismo tiempo en realizar sus propagaciones de ida y vuelta, aunque sus velocidades medias habían sido diferentes, y de ello parecía inferirse que estas trayectorias tenían que ser de diferentes longitudes. La situación podía explicarse totalmente suponiendo que el movimiento de un objeto hacía que éste se contrajera en la dirección de su movimiento, pero no en dirección perpendicular, justamente lo bastante para compensar la diferencia de las velocidades de los dos semihaces de luz.[2] Tal contracción jamás podía comprobarse por medición directa, puesto que la regla o metro se contraería exactamente lo mismo que el objeto que se estuviera midiendo. Pero Lorentz demostró que la teoría electromagnética de Maxwell predecía una contracción de la cuantía exacta requerida, de tal suerte que el experimento Michelson-Morley no podía haber dado otro resultado que el que dio; en realidad, no hizo sino confirmar aquella teoría.

Y, no obstante, si hubiera un éter, la Tierra tenía que moverse a través de él, y parecía inconcebible que ese movimiento borrara sus huellas tan completamente que pudiera eludir todos los recursos de la ciencia experimental. Sin embargo, lo inconcebible aconteció; se ideó un gran número de otros experimentos para descubrir el movimiento de la Tierra a través del éter, y todos dieron el mismo resultado; si hubiera un éter, las cosas se presentaban como si la Tierra estuviera permanentemente inmóvil dentro de él.

En 1905 Albert Einstein imprimió un nuevo giro a toda esta discusión. Era entonces un inspector de patentes en la Oficina de Patentes de Berna. Había nacido de padres judíos en Ulm el día 14 de mayo de 1879, se había educado en Múnich, en Italia y en Aarau (Suiza), y había sido profesor en Zúrich y en Schaffhausen antes de radicarse en Berna. Posteriormente ejerció el profesorado, o cargos similares, en Zúrich, Praga, otra vez en Zúrich, en el Instituto de Física del káiser Guillermo, de Berlín, en Oxford y en Princeton. Murió en 1955.

Hemos dado ya noticia de algunos ejemplos de resultados científicos deducidos de principios de aspecto muy general, como la imposibilidad del movimiento continuo, empleado de esta manera por Leonardo (p. 148), por Stevin (p. 170) y por Helmholtz (p. 312). Einstein pensó que la acumulación de resultados experimentales mencionados hace un instante podía señalar la existencia de un principio general semejante, el cual enunció en la forma siguiente: “Es imposible que un observador pueda determinar la velocidad del movimiento de un objeto a través del espacio”. La experiencia ha demostrado que en la práctica es imposible; Einstein entonces opinó que también en principio era imposible; no porque la habilidad humana estuviera incapacitada para encontrar la manera de conseguirlo, sino porque la constitución del mundo y las leyes naturales lo hacían imposible.

Este nuevo principio implicaba que todos los fenómenos de la naturaleza debían de ser lo mismo tanto para una persona que se moviera con cierta velocidad como para otra que se moviera con velocidad diferente, lo que explicaba inmediatamente los resultados negativos del experimento Michelson-Morley y de todos los semejantes. Demostraba, además, que la naturaleza no tenía nada que ver con velocidades absolutas, sino única-

mente con velocidades relativas. Por esto se le ha llamado el *principio de la relatividad*.

Sugirió, e incluso estimuló, una nueva interpretación de los fenómenos físicos, y un nuevo punto de vista acerca de los objetivos de la ciencia. La velocidad de la luz, según ahora aparecía, no era constante respecto de un espacio absoluto enclavado por un éter material, sino relativa al observador; éste y no el éter se convertía ahora en el hecho central de la situación. A medida que se desarrollaba esta cuestión, se fue poniendo en claro que los fenómenos de la naturaleza eran determinados por nosotros y por nuestra experiencia más que por un universo mecánico exterior a nosotros e independiente de nosotros. Demócrito, en la lejana primera infancia de la ciencia, retiró la importancia de nosotros y de nuestras sensaciones y la trasladó a una naturaleza objetiva exterior a nosotros; el nuevo principio se incautaba de ella y la transfería otra vez a nosotros y a nuestras dimensiones subjetivas.

Si el nuevo principio era una consecuencia necesaria de la constitución del cosmos, debía decirnos algo acerca de su constitución. De acuerdo con esto, Einstein examinó las inferencias físicas del nuevo principio. Halló que se adaptaba enteramente a la teoría electromagnética de Maxwell, pero que en algunos aspectos era incompatible con la mecánica de Newton. Por ejemplo, la masa de un objeto dependería ahora de su velocidad de movimiento. J. J. Thomson ya había demostrado que esto era cierto para un cuerpo cargado de electricidad; el nuevo principio requería que fuera también cierto para todo objeto en movimiento. El principio precisaba, además, que toda energía poseyera masa; por ejemplo, la energía cinética de un objeto que se mueve rápidamente lo dotaba de la masa adicional que acabamos de enunciar. De tal suerte, asimismo, todo objeto que va perdiendo energía debe también perder masa; la radiación solar, por ejemplo, significaba una disminución de su masa de

la categoría de 250 millones de toneladas por minuto, y el problema de hallar el origen de la radiación del Sol conllevaba el de hallar cómo el Sol podía perder tanta masa. En resumen, que los dos grandes principios de *conservación de la masa* y *conservación de la energía* pasaban a ser idénticos.

Espacio-tiempo. En 1908, el matemático polaco Minkowski presentó el contenido total de la teoría en forma nueva y muy elegante. Hasta entonces se habían considerado las leyes de la naturaleza como descripciones de fenómenos producidos en un espacio de tres dimensiones, a la vez que el tiempo seguía su marcha uniforme e imperturbablemente en otra dimensión enteramente distinta. Minkowski estableció entonces la hipótesis de que esta cuarta dimensión, el tiempo, no estaba separada de un espacio tridimensional ni era independiente de él. Introdujo un nuevo espacio cuatridimensional al cual contribuían el espacio ordinario de tres dimensiones y el tiempo con una más; podemos llamar a esto *espacio-tiempo*. Todo punto incluido en el espacio-tiempo residiría con tres dimensiones en el espacio ordinario y con una dimensión en el tiempo, y de esta manera representaría la posición de una partícula en el espacio ordinario en un determinado instante del tiempo. La sucesión de las posiciones que ocupaba una partícula en el espacio ordinario en una sucesión de instantes del tiempo estaría representada por una línea en el espacio-tiempo; a ésta la llamó la *línea cósmica* de la partícula.

Cuando formulamos las leyes de la óptica ordinaria, pensamos corrientemente que la luz se está propagando en tres dimensiones. La gravedad domina nuestras vidas de cada día en tal manera que siempre pensamos casi instintivamente en el espacio ordinario como consistente en dos dimensiones horizontales y una vertical. Pero la óptica ordinaria no sabe nada de la gravedad, de lo que resulta que las leyes de la óptica no admiten ninguna diferencia entre la vertical y la horizontal. El espacio

puede dividirse en tres dimensiones de cualquier otra manera, pero las leyes de la óptica permanecen en su estructura exactamente iguales que eran antes. Ahora bien, de igual manera que las leyes de la óptica se refieren a un espacio tridimensional en el cual no se hace distinción alguna entre la horizontal y la vertical, asimismo las leyes de la naturaleza se refieren a un espacio-tiempo cuatridimensional, en el cual no se hace distinción alguna entre el espacio y el tiempo. Tal es, por lo menos, el contenido de la teoría de la relatividad tal como la ha transformado Minkowski. En otros términos, la naturaleza se niega a romper el espacio-tiempo cuatridimensional en espacio absoluto y en tiempo absoluto respecto de nosotros.

De esta suerte, el espacio absoluto y el tiempo absoluto de Newton salen del ámbito de la ciencia y arrastran mucho consigo en esta retirada. El primero en desaparecer fue el concepto *simultaneidad*. Si no existe gravedad alguna, la dirección vertical no significa nada, como tampoco tiene significado alguno decir que dos puntos están a la misma altura. De igual manera, si no existe tiempo absoluto, carece de significado el decir que dos acontecimientos, en diferentes puntos, ocurren al mismo tiempo, ni incluso, en ciertos casos, que uno se produjo antes que el otro. Esto dejó sin significación alguna a la ley de gravitación de Newton. Nada significa decir que un Sol en *S* atrae a una Tierra en *E* con una fuerza que depende de la distancia *ES,* a menos que otorguemos algún significado definido a *ES.* Para hacer esto tenemos que conocer la posición del Sol en un determinado instante, y la de la Tierra *en ese mismo instante,* y si la simultaneidad no significa nada, entonces esto tampoco significa cosa alguna. Se hace, pues, necesario ahora, encontrar algún modo de considerar la gravitación que no suponga simultaneidad. Einstein lo halló mediante su *principio de equivalencia*.

El principio de equivalencia. Cuando el aeroplano en que viajamos hace un rápido viraje, nuestras ideas sobre la horizontal y

la vertical se hacen extrañamente confusas; parece que la gravedad ha cambiado de dirección. La explicación es que el avión y todo lo que contiene están experimentando una aceleración que produce efectos precisamente semejantes a los de la gravitación, de tal modo que la aceleración y la fuerza gravitatoria original parecen combinarse en una nueva fuerza de gravedad que actúa en nueva dirección. De igual manera, cuando un ascensor arranca y se detiene rápidamente, la aceleración actúa como una nueva fuerza de gravitación y se combina con la antigua fuerza de manera tan difícil de distinguir que el peso de nuestro cuerpo parece experimentar un cambio instantáneo.

Todas estas consideraciones llevaron a Einstein, en 1915 a proponer un nuevo principio: el principio de equivalencia, que dice que el efecto de la gravitación y de la pseudogravitación de una aceleración no sólo parecen ser similares, sino que realmente lo son, tanto que ningún experimento puede distinguirlas. Se halló que esto provocaba consecuencias sorprendentes. Hemos visto que toda división del espacio-tiempo de Minkowski en un espacio ordinario y en tiempo, es cuestión que depende de nuestra propia elección y, por tanto, es subjetiva. Para enunciar con objetividad las leyes de la naturaleza, no debemos proceder en términos corrientes de espacio y tiempo, sino en términos del espacio-tiempo de Minkowski como un todo; el contenido total del principio de relatividad es que así pueden enunciarse. Por ejemplo la primera ley de Newton puede enunciarse en la forma de que la línea cósmica de una partícula sobre la cual no actúa ninguna fuerza es una línea recta. Por consiguiente, si una partícula es solicitada por la gravitación, su línea cósmica no puede ser una línea recta. Podíamos esperar que fuera una línea curva, como ciertamente lo es, pero la curvatura es inherente al espacio-tiempo de Minkowski, y no a la línea cósmica. Para describir objetivamente los efectos que hasta entonces se habían atribuido a una fuerza gravitatoria, juzgó

Einstein necesario pensar que el espacio-tiempo es curvo. Podía compararse a la curvatura de un globo de goma, en el que el espacio-tiempo cuatridimensional correspondiera a la superficie del globo, y no al espacio interior o exterior de éste. Hay una curvatura especial en la proximidad de la materia, aunque no debemos decir que la materia es la causa ni el efecto de la curvatura. En este espacio-tiempo curvo la línea cósmica de una partícula, sometida o no a la gravitación, es una *geodésica,* palabra que necesita explicación.

Geodésicas son, en resumen, distancias mínimas. Este término se emplea en geografía (ordinariamente en la forma de *líneas geodésicas*) para denotar el camino más corto de un lugar a otro sobre la superficie de la Tierra. Ejemplo: la trayectoria de un avión volando por el camino más corto desde un aeropuerto a otro, o el camino señalado por un bramante estirado y sujeto fuertemente contra la superficie de un globo geográfico. En matemáticas se emplea más generalmente esta palabra para denotar la línea más corta desde un punto a otro sobre una superficie curva o por un espacio curvo. En cualquier superficie no curva o en cualquier espacio no curvo, las geodésicas son naturalmente líneas rectas.

Toda región del espacio-tiempo que no tiene masas gravitando en su proximidad no es curva, de suerte que las geodésicas, en este caso, son líneas rectas, lo cual significa que las partículas se mueven en trayectorias rectilíneas a velocidades uniformes (primera ley de Newton). Pero las líneas cósmicas de los planetas, cometas y proyectiles terrestres son geodésicas en una región del espacio-tiempo, curva por la proximidad del Sol o de la Tierra, y, por consiguiente, no son líneas rectas. Sin embargo, no se necesita ninguna fuerza de gravitación para imprimir curvatura a las líneas cósmicas; su curvatura depende del espacio, exactamente igual que la curvatura de la trayectoria de un avión depende de la curvatura de la superficie de la Tierra.

Las teorías de Newton y de Einstein predecían el mismo movimiento para un cuerpo que estuviera libre de la acción de todas las cosas, a saber, el movimiento uniforme en línea recta. También predecían el mismo movimiento para un cuerpo que se moviera lentamente bajo la acción de una masa gravitatoria. Hasta este punto, por consiguiente, era imposible intentar una observación que decidiera entre ambas teorías. Pero las dos teorías preveían diferentes movimientos para cuerpos que se movieran con grandísimas velocidades, de suerte que las observaciones hechas sobre tales cuerpos daban la esperanza de poder decidir entre las dos teorías.

Según las leyes de Newton, un planeta que gravita alrededor del Sol debe describir una elipse perfecta; según la teoría de Einstein, esta elipse debe girar lentamente en su propio plano. Desde hace largo tiempo se sabe que la órbita de Mercurio (la de más rápido movimiento entre todos los planetas) muestra un movimiento de rotación exactamente de este género; ya antes lo había observado Leverrier, y el astrónomo norteamericano Simon Newcomb había medido su magnitud. Se habían frustrado muchos intentos de explicarlo; la teoría de Einstein no sólo lo explicaba inmediatamente, sino que predecía su verdadera magnitud.

Fue posible intentar otras observaciones, porque el principio de relatividad requería que un rayo de luz se desviara cuando pasara cerca de una masa gravitante. De esta suerte las estrellas que se ven próximas al Sol en el firmamento deben resultar desplazadas de sus verdaderas posiciones. Estos desplazamientos sólo pueden observarse durante un eclipse total de Sol y no se habían observado cuando apareció la teoría de Einstein. Se hallaron inmediatamente cuando los observatorios de Greenwich y de Cambridge enviaron expediciones a estudiarlas en el eclipse de 1919, y su descubrimiento convirtió inmediatamente al público científico en partidario de Einstein; des-

de entonces se aceptó que su esquema debe sustituir al de Newton.

Por último, el principio de relatividad exige que cuando la luz se produce en una región en la cual actúan fuerzas gravitatorias, como en la superficie de una estrella, las líneas del espectro de dicha luz deben desplazarse hacia el extremo rojo del espectro. El efecto es tan débil, que ordinariamente es difícil de observar, pero se encuentra de manera inequívoca en la luz emitida por densos grupos de estrellas, caso en que su magnitud llega al máximo. Esto se ha convertido en uno de los más corrientes útiles para el trabajo astronómico, pues proporciona, además, el medio de medir las masas y diámetros de los grupos densos de estrellas.

Este esquema de Einstein viene en línea directa de sucesión del principio de Herón (p. 100), que dice: en el espacio ordinario, un rayo de luz toma el camino más corto entre dos puntos cualesquiera de este camino (o sea, que su línea cósmica es una geodésica). De esta suerte, en cuanto atañe a la luz, el esquema de Einstein extiende este principio meramente a un espacio-tiempo curvo, y afirma que, incluso cerca de las masas gravitantes, la línea cósmica de un rayo de luz es también su distancia más corta, aunque ya no pueda ser una línea recta. Lo mismo es en buena parte respecto del movimiento de masas materiales. El principio de acción mínima determinaba la trayectoria de un planeta de manera que constituyera una cierta cantidad mínima; el nuevo principio de Einstein también lo determina para hacer que cierta cantidad sea un mínimo; esto es, la longitud de una línea cósmica. Es de interés comparar esta última solución con los anteriores esfuerzos para explicar las órbitas planetarias. Pasemos en revista las complicadas esferas, conectadas entre sí, de Eudoxio y de Callipo, las intrincadas circunferencias y epiciclos de Ptolomeo y de los medievales, las elipses de Kepler, Newton y la mayor parte de los modernos,

hasta que, finalmente, terminamos con la muy sencilla *distancia mínima* de Einstein. Éste es un ejemplo asombroso de cómo trabaja la naturaleza de manera extraordinariamente sencilla cuando estudiamos sus problemas en la dirección justa.

Los dos esquemas de Einstein y de Newton son polos opuestos en sus interpretaciones físicas, pero sería un error pensar que el esquema newtoniano no es más que un cúmulo de inexactitudes. El error cuantitativo en la ley de gravitación de Newton es tan pequeño que habían de transcurrir cerca de 200 años antes de que en él se descubriera ningún error, ni aun que se sospechara. Verdaderamente, la diferencia entre las leyes de Newton y de Einstein depende del cuadrado de la pequeña relación v/c, en la que v es la velocidad de un planeta gravitando y c es la velocidad de la luz. Incluso en el planeta más rápido, Mercurio, este cuadrado es solamente 0.00000003; en todo el sistema solar, las dos teorías difieren cuantitativamente en sólo esta pequeñísima fracción o en menos. Y cuando descendemos de los cielos a la Tierra, encontramos una ciencia de todos los días que es todavía completamente newtoniana; el ingeniero que está construyendo un puente, o un navío o una locomotora hace exactamente lo que hubiera hecho si el reto de Einstein a Newton no se hubiera producido jamás, y lo mismo le ocurre al que hace los cálculos para preparar el *Almanaque Náutico,* y al astrónomo que estudia el movimiento general de los planetas.

Cuando la teoría explicó de manera tan sencilla la aparente fuerza de gravitación, era natural que cayeran bajo revisión fuerzas de otros géneros, particularmente las de electricidad y magnetismo. Faraday y Maxwell habían imaginado que la existencia de fuerza eléctrica en un punto indicaba una perturbación o un desplazamiento del éter en dicho punto, caso en el cual la fuerza eléctrica tendría un valor definido en cualquier punto del espacio. Ahora, la teoría de relatividad demostraba que la fuerza de un punto era simplemente cuestión de medida.

Diferentes modos de medir la fuerza dieron diferentes valores, y todos eran igualmente justos; la fuerza absoluta era, según se veía, tan ilusoria como espacio y tiempo absolutos. De igual manera, se encontró que la masa de un cuerpo en movimiento depende, en sus medidas, de la velocidad de movimiento, y ésta, a su vez, depende de la manera de medir o, en otras palabras, de la velocidad de movimiento. Por consiguiente, la masa absoluta cae fuera del ámbito de la ciencia; y como la energía es proporcional a la masa, igualmente la energía absoluta cae fuera del dominio de la ciencia. Hubo que abandonar la idea de que la energía estaba localizada en las diferentes partes del espacio.

Einstein y otros han intentado construir una "teoría de campo unitaria", que interpretara ambas fuerzas, la electromagnética y la gravitatoria, en un único sistema comprensivo como consecuencias de las propiedades del espacio. Sería inadecuado decir que no se ha hecho ningún progreso en este sentido; pero lo cierto es que no se ha conseguido ningún completo éxito, y que en el momento actual no existe una teoría unitaria que merezca aceptarse por completo. Nos encontramos en la misma frontera del conocimiento, y la interpretación de la fuerza electromagnética mora aún en lo inconquistado desconocido.

Física experimental

Al mismo tiempo que la física matemática iba obteniendo estos sensacionales resultados, la física experimental examinaba su propia serie de sensaciones que inauguraron la era de la física moderna. La segunda mitad del siglo XIX había producido grandes mejoras en muchos de los instrumentos para la investigación física, de las cuales nació una nueva física. En particular, se perfeccionó la máquina neumática hasta casi más allá de toda posibilidad, de manera que todo experimentador tuvo alto vacío a su disposición y pudo estudiar los fenómenos de los ga-

ses con camino libre medio de varios milímetros de longitud. Esto condujo al descubrimiento de una ínfima partícula electrizada: el electrón. Se comprobó que era un ingrediente de cierto género en la constitución del átomo. Posteriormente, se halló que toda materia es de estructura completamente eléctrica.

Estructura eléctrica de la materia

Cuando se interrumpe una corriente eléctrica, se ve, con frecuencia, saltar una chispa a través del momentáneo espacio abierto entre los dos extremos del interruptor; el momento de la corriente ha seguido su propia trayectoria durante un instante, pero inmediatamente se le ha opuesto la gran resistencia del aire en este espacio libre; porque el aire, en condiciones ordinarias, es mal conductor de la electricidad. Si el interruptor estuviera situado en un recipiente del cual se hubiera extraído parte del aire, se observaría el mismo fenómeno en forma muy ampliada, porque un gas enrarecido ofrece menor resistencia al paso de la corriente. Con gas a presión suficientemente baja y a suficiente voltaje, se puede mantener una corriente permanente entre los dos extremos de un conductor a considerable distancia el uno del otro, y si el recipiente es de vidrio, se observa que se produce una fosforescencia característica en sus paredes.

La observación de que la electricidad pasa con más facilidad a través de un vacío imperfecto que al través del aire a la presión ordinaria, la hizo primeramente Watson en 1752. El primero que registró el resplandor fosforescente fue Faraday, en 1838. Desde 1859 en adelante, el paso de las corrientes eléctricas a través de los gases se estudió detalladamente en Alemania, especialmente por Geissler, Plücker y Hittorf. Este último demostró, en 1869, y Goldstein en 1876, que la corriente fluía normalmente en líneas rectas, y que su fluir podía obstruirse colocando un obstáculo sólido en su trayectoria. Esto se consi-

guió proyectando una "sombra" en las paredes del recipiente, la cual se mostraba por la ausencia de la fosforescencia característica. Pero sólo uno de los dos extremos del conductor, el cátodo, lanzaba esta sombra, lo cual parecía demostrar que la corriente eléctrica consistía sólo en un sentido: la electricidad negativa propagándose del cátodo al ánodo; por esta razón se describió como consistiendo únicamente en rayos catódicos.

En Alemania se pensó que estos rayos eran ondas, caso en el cual la sombra proyectada por un obstáculo sería exactamente igual a la sombra de un individuo que está al sol. Pero cuando Varley y Crookes pasaron los rayos entre los polos de un potente imán, hallaron que la sombra cambiaba su posición; las fuerzas magnéticas habían desviado la trayectoria de los rayos. Ahora bien, en electromagnetismo es muy conocido el hecho de que las fuerzas magnéticas desvían de su trayectoria las partículas electrizadas móviles, pero no desvían las ondas electromagnéticas. Por esta causa, lo que habían observado Varley y Crookes hizo pensar que los rayos catódicos eran la expresión de partículas electrizadas que transportan electricidad exactamente igual que un chaparrón transporta agua en gotas de lluvia. En 1895, Perrin enunció que un conductor se carga de electricidad negativa cuando caen sobre él los rayos catódicos, de igual manera que el pavimento se moja cuando sobre él cae la lluvia.

Los rayos catódicos. El problema acerca de cuál es la naturaleza de los rayos catódicos quedó resuelto en el año 1897, con resultados que forman época. Ya hemos visto que eran partículas cargadas. La cuantía de la desviación que sufre una partícula cargada que pasa un campo magnético depende a la vez de la carga eléctrica que lleva la partícula y de la masa de ésta; si la carga es grande, la desviación es grande también, porque las fuerzas magnéticas tienen mejor asidero en la partícula, en tanto que si la masa es grande la desviación es pequeña, porque

hay más inercia que resiste el cambio. El grado de la desviación depende, asimismo, de la velocidad de movimiento de la partícula cargada. Si se conoce la velocidad del movimiento, con la medida de la desviación se hace posible valorar la relación de la carga de una partícula con su masa, relación comúnmente representada por *e/m.* Esto lo hizo por vez primera, para las partículas de rayos catódicos, en 1890, Arthur Schuster, entonces profesor de física en Manchester. Ya estaban familiarizados los físicos con una relación de la carga a la masa, a saber, la del ion de hidrógeno en la electrólisis. Estimó Schuster que en las partículas catódicas la relación era aproximadamente 500 veces mayor[3] y, presumiendo que no podía haber partículas menores que los átomos, dijo, en conclusión, que las partículas catódicas debían de ser átomos sumamente cargados. Pero en 1892 halló Hertz que estos rayos podían atravesar láminas metálicas muy delgadas hasta un grado que parecía imposible para partículas de magnitud atómica, de suerte que si los rayos consistían en partículas, éstas debían de ser de magnitud inferior al átomo.

Estaba claro que esto era de gran importancia, y entonces se trabajó mucho para averiguar la velocidad de propagación de estas partículas, como consecuencia de la relación de la carga a la masa. En 1897, J. J. Thomson en Cambridge y Wiechert en Alemania ensayaron independientemente de manera que sus partículas las desviaran simultáneamente fuerzas eléctricas y magnéticas para que de este modo pudiera medirse directamente la velocidad, y dedujeron la relación *e/m.* Por estos y por otros muchos experimentadores se halló que la relación era aproximadamente 1 800 veces tan grande como en el átomo de hidrógeno.

En 1896 se había inventado un nuevo sistema de aparato que probó entonces ser de máxima utilidad. C. T. R. Wilson, después profesor de filosofía natural de Cambridge, inventó su famosa cámara de niebla, en la cual las partículas cargadas de

electricidad prenden gotas de agua envolviéndolas, de igual manera que ocurre en la atmósfera para formar las gotas de lluvia. Puede producirse una lluvia artificial dejando que estas gotas caigan sobre el suelo de la cámara. La magnitud media de las gotas puede estimarse anotando la velocidad de su caída contra la resistencia del aire, y el número total en esta lluvia puede calcularse entonces por el peso total del agua que haya caído. Mediante un electroscopio se puede medir la carga de esta agua y entonces es posible valorar numéricamente la carga de cada gota.

Con este aparato halló Thomson en 1899 que las partículas catódicas llevan la misma carga que los iones de hidrógeno en la electrólisis. Obtuvo el mismo valor para partículas que provenían de otro origen enteramente distinto, como, por ejemplo, de una placa de zinc bombardeada por radiación ultravioleta, al mismo tiempo que J. S. Townsend, más tarde profesor de física en Oxford, obtuvo resultados análogos de un estudio sobre la cuantía en que se difunden mutuamente los iones gaseosos. Quedó entonces fuera de duda que el elevado valor de *e/m* para las partículas catódicas no procedía de una carga elevada, sino de una pequeña masa; ésta podía ser sólo de poco más o menos que $^{1}/_{1\,800}$ de la masa del átomo de hidrógeno.

Todo esto persuadió a los físicos de que estaban tratando con partículas mucho más pequeñas que el átomo de hidrógeno, el cual hasta entonces se había supuesto que era la menor partícula existente en la naturaleza, y, de hecho, en toda la materia se hallaban estas nuevas partículas. Se encontraron en todas partes y siempre eran las mismas, cualquiera que fuere la fuente de donde provenían; se les dio el nombre de *electrones,* nombre que ya había sido propuesto por Johnson Stoney, de Dublín.

El físico holandés Hendrik Antoon Lorentz amplió entonces la teoría eléctrica de Maxwell con objeto de que explicara los nuevos hechos. La luz, por ejemplo, sería producida por el mo-

vimiento de los electrones dentro del átomo. El curso de este movimiento podrían modificarlo las fuerzas magnéticas, de suerte que si una sustancia emitiera luz en el campo magnético, esta luz sería diferente de la emitida en condiciones normales. Por entonces, P. P. Zeeman, profesor de física en Ámsterdam, ya había observado un efecto de este género en el año 1896 (el *efecto Zeeman*). Al principio, esta modificación parecía consistir en un simple ensanchamiento de las líneas del espectro; mas, cuando se empleó un imán más poderoso, se vio que cada línea se hendía en cierto número de componentes separados. Lorentz afirmó, al efecto, que esto podía explicarse por el movimiento de partículas eléctricas dentro del átomo, cada una con carga y masa iguales a las del electrón.

Parecía estarse en lo cierto al suponer que la luz la produce el movimiento de los electrones en el interior del átomo. Por otra parte, como la carga total del átomo normal era *nula,* fue lógico afirmar que el átomo normal estaba formado por cierto número de electrones en movimiento con una carga positiva suficiente para neutralizar exactamente la carga total de todos los electrones.

Newton había supuesto que la masa de un cuerpo permanecía la misma a través de todos sus cambios de movimiento; pero no menos lejos que en 1881, J. J. Thomson halló que no ocurre así si el cuerpo está electrizado; las ecuaciones de Maxwell exigían que la masa de un cuerpo electrizado aumentara a medida que creciera su velocidad de movimiento, porque un cuerpo cargado es inestable; consiste, en parte, en líneas de fuerza lanzadas desde el cuerpo al espacio infinito. A medida que la velocidad del cuerpo aumentaba, estas líneas de fuerza tomaban nueva disposición, de suerte que produjeran oposición creciente a mayor cambio; en pocas palabras: la masa aparente del cuerpo aumentaba. La masa de un cuerpo podía en tal caso dividirse en dos partes, una interna, o masa newtoniana, que no

experimenta cambio, y otra externa, o masa eléctrica, que depende de la velocidad de movimiento.

A partir de 1906, cierto número de físicos (Kaufmann, Bucherer, Bestelmeyer y otros) investigaron experimentalmente de qué manera la masa de un electrón en movimiento dependía de su velocidad, y hallaron el resultado sensacional de que la dependencia buscada era exactamente la que Thomson había calculado para la parte eléctrica sola. Dicho de otro modo, el electrón carecía de masa newtoniana, y su masa se mostraba como enteramente eléctrica. Era hipótesis razonable que lo mismo sería cierto para la electricidad positiva del átomo, de suerte que toda materia parece consistir simplemente en electricidad. A la pregunta de "cuál sea la íntima sustancia del universo" que había mantenido perpleja a la ciencia desde los tiempos de Tales, parecía, al fin, posible darle una respuesta, con una singular, única palabra: *electricidad*.

Rayos X. Es digno de notar el año 1895 por el descubrimiento de los rayos Röntgen, o rayos X, como se llaman frecuentemente, hecho por Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923), de Múnich. Muchos experimentadores habían encontrado, con gran disgusto suyo, que las placas fotográficas depositadas cerca de tubos para descargas eléctricas se inutilizaban, porque se velaban; pero la mayor parte de ellos lo consideraban como un perjuicio que reclamaba nuevo lugar de almacenaje más que un fenómeno científico que debiera estudiarse. Sin embargo, Röntgen sintió curiosidad por averiguar la causa de estas veladuras, y supuso que los tubos emitían alguna, hasta entonces desconocida, forma de radiación que podía pasar a través del material donde estaban empaquetadas las placas. Casi accidentalmente descubrió que allí existía tal radiación; era invisible, pero podía captarse debido a su propiedad de convertir en luminoso el material fosforescente. Esta propiedad de la radiación facilitaba su estudio. Se halló bien pronto que una placa gruesa de metal

la detenía por completo, pero que podía atravesar placas metálicas delgadas o bien sustancias ligeras, como cartón, papel, madera o carne humana, y que después de atravesarlas podía aun afectar a una pantalla fosforescente o a una placa fotográfica, de modo que era posible fotografiar los huesos dentro de un cuerpo vivo, a través de su envoltura de carne. Este descubrimiento interesó al profano casi tanto como al físico profesional, y se demostró que era de gran valor en las ciencias quirúrgica y médica.

Durante varios años no pudieron los físicos decidir si esta radiación consistía de partículas o de ondas. Si consistía de partículas, debían estar descargadas, porque a esta radiación no la desvían las fuerzas magnéticas. Si son ondas electromagnéticas, éstas habían de tener muy corta longitud de onda, porque la radiación era mucho más penetrante que la luz visible.

El problema lo resolvieron tres físicos alemanes en 1912. Laue vio que si la radiación consistía en ondas cortas, entonces los átomos dispuestos de manera regular en un cristal debían producir difracción, exactamente igual que el rayado regular en una red de difracción (p. 238) difracta la luz visible, y calculó el tipo general de la pauta de difracción que debía esperarse de esta hipótesis. Cuando Friedrich y Knipping hicieron el experimento para probar tal hipótesis, hallaron exactamente el tipo de pauta que Laue había previsto.

Esto indicaba que la radiación es de naturaleza electromagnética, pero dio lugar a consecuencias más amplias. Las diferentes disposiciones de los átomos en un cristal producirían, naturalmente, diferentes tipos de difracción, de suerte que las disposiciones atómicas podían deducirse del tipo de difracción observado. La nueva técnica la desarrollaron con rapidez William Bragg y su hijo Lawrence Bragg, e igualmente otros varios. Los Bragg estudiaron, en primer lugar, sustancias muy sencillas, como los cloruros de sodio y de potasio, y hallaron

que sus átomos formaban tipos cúbicos regulares en los cuales hay un átomo en todos los vértices de cada uno de los cubos. Estos, como otros compuestos inorgánicos que estudiaron después, no mostraban ningún apareamiento de los átomos en moléculas; en el estado sólido, el átomo había pasado a convertirse en la unidad. Mas cuando, en 1921, sir William Bragg investigó en varios compuestos orgánicos, como el naftaleno y el antraceno, halló que las moléculas mantenían sus identidades como apretados racimos de átomos.

El análisis, por medio de los rayos X, de sustancias sólidas, resultó de importantísimo valor en metalurgia y en bioquímica, pero del descubrimiento de los rayos X acaso se benefició más que todos ellos la física experimental. Porque esta radiación transformaba todo gas, a cuyo través pasaba, en conductor de la electricidad, en el cual podía estudiarse la electricidad en su más simple forma y bajo las más simples condiciones. Acaso dio, más que ninguna otra cosa, el primer impulso al progreso triunfal de la física en el periodo de que ahora vamos a ocuparnos.

Radiactividad. Al descubrimiento de los rayos X siguió muy pronto el de otras nuevas radiaciones. La emisión de los rayos X es un acontecimiento transitorio que sólo se da mientras se está propagando una corriente eléctrica, pero estas otras radiaciones son permanentes; son emitidas continuamente por ciertas sustancias. La principal de estas sustancias es el uranio, elemento químico aislado por Peligot en 1841, con un peso atómico de 238, el elemento más pesado conocido hasta fecha muy reciente (p. 364). En febrero de 1896, el profesor Henri Becquerel halló que cierto compuesto de uranio emitía continuamente radiación, y por su propia cuenta, la cual se asemejaba a los rayos X en su profunda penetración de la materia, impresionando las placas fotográficas, excitando fosforescencias y transformando los gases que atravesaba en conductores de la electrici-

dad. Se halló muy pronto que esta propiedad se hallaba en el uranio mismo y, dos años después, Schmidt y Madame Curie encontraron, independientemente, que el torio, otro elemento pesado que había descubierto Berzelius en 1828, poseía análogas propiedades. Esto inspiró a Madame Curie y a su marido, el profesor Pierre Curie, a emprender una investigación sistemática de sustancias que manifestaran *radiactividad,* como se llamó a esta nueva propiedad. Después de prolongada investigación que nada nuevo reveló, ensayaron con la pechblenda, portadora del metal uranio, de la cual se extrae éste, y hallaron que era cuatro veces tan radiactiva como el uranio que habían extraído de ella. Por tanto, la pechblenda debía contener alguna sustancia radiactiva que era más poderosa que el mismo uranio. Trabajando con Bémont, en 1898 separaron esta sustancia y la llamaron *radio*. Se comprobó que era otro elemento pesado, de peso atómico 226, miles de veces más radiactivo que el uranio. Encontraron también otro elemento, el polonio,[4] de peso atómico 210, que poseía semejante potencia, mientras que en 1899, Debierne y Geisel descubrieron aun otro, el actinio, de peso atómico 227. Todos estos elementos radiactivos son más pesados que cualquiera conocido hasta entonces; hablando más claramente, la radiactividad es una propiedad peculiar de los átomos más pesados, siendo radiactivos todos los elementos más pesados que el plomo (207) y el bismuto (209).

Todo esto entonces llamó la atención de Ernest Rutherford, después lord Rutherford de Nelson, que acababa de ser nombrado profesor de física en la Universidad McGill. Halló éste en 1899 que la radiación consistía en dos distintos géneros de rayos, a los que llamó *rayos α* y *rayos β*. Se separaron con facilidad por sus diferentes poderes de penetración; los rayos α reducían a la mitad su fuerza después de haber atravesado $^1/_{50}$ milímetros de una lámina muy delgada de aluminio, pero los rayos β sólo después de atravesar $^1/_2$ milímetros. En el año 1900 halló

Villard que el radio emitía, además, un tipo de radiación más penetrante, al cual llamó radiación γ, o rayos γ. Se comprobó que todas las radiaciones de las sustancias radiactivas consistían en uno o más de estos tres tipos.

La próxima cuestión se refirió a la naturaleza y estructura de estas radiaciones. En 1899, Giesel, Becquerel, Curie y otros examinaron los rayos β por el método que había empleado J. J. Thomson para medir la velocidad y la carga de las partículas de rayos catódicos (p. 350), y encontraron que eran partículas análogas a éstas, excepto que se movían con mayor velocidad, aproximándose, de hecho, a la velocidad de la luz. De esta suerte, los rayos β eran simplemente andanadas de electrones de grandísima velocidad.

De manera análoga, en 1903 halló Rutherford que los rayos α eran partículas cargadas de electricidad positiva moviéndose a gran velocidad. Estas partículas se desvían muy poco lo mismo en un campo eléctrico que en un campo magnético, lo que demuestra que sus masas deben ser muy grandes en comparación con sus cargas (la fuerza que las proyectaba era pequeña comparada con el momento que llevaban en su marcha). Posteriormente (1906), descubrió que cada partícula tenía una masa mayor que 7 000 veces la del electrón y una carga doble que la del electrón, aunque de signo contrario. La naturaleza verdadera de estas partículas se descubrió tres años después, cuando Rutherford y Royds dispararon un haz de ellas a través de una ventana de vidrio muy delgado, de un grueso inferior a 0.01 milímetros, a una cámara de la cual no podían escapar. Hallaron que en esta cámara se formaba gas helio (p. 289), y que continuaba acumulándose allí durante todo el tiempo en que seguían entrando partículas α. Era evidente que el átomo de helio tenía partículas α como uno de sus constituyentes. Se halló que los otros dos eran electrones que se necesitaban para neutralizar la carga de la partícula α y que de esa manera el átomo, en

total, quedaba eléctricamente neutro. De esta manera se probó que la partícula α era simplemente el átomo de helio al que se le habían sustraído sus dos electrones, o bien, como diríamos en la actualidad, el "núcleo" del átomo de helio (p. 363).

Un problema más difícil lo plantearon los rayos γ, que se negaban enteramente a desviarse, lo mismo en un campo eléctrico que en un campo magnético, γ, por tanto, podían lo mismo ser partículas sin carga u ondas electromagnéticas. Definitivamente, después de mucho estudio y discusión, se comprobó que eran ondas de longitud muy corta, aproximadamente 250 mil millonésimos de milímetros, o menos que la cienmilésima parte de la longitud de onda de la luz visible. Como los rayos X tienen más corta su longitud de onda, su poder de penetración es mayor que el de la luz visible; pero la radiación γ, con una longitud de onda todavía menor, tiene un poder de penetración mayor que ambos.

Entretanto, fue descubriéndose larga serie de nuevas sustancias radiactivas, aisladas y estudiadas en rápida sucesión. En 1899 Rutherford observó que una masa de torio parecía hacerse menos radiactiva si se lanzaba sobre ella una corriente de aire. El misterio se resolvió cuando aquél descubrió que el torio emitía un gas pesado muy radiactivo. Este gas quedaba adherido al torio envolviendo su superficie, en tanto que el aire del alrededor estaba tranquilo, pero un soplo de viento barría todo el gas y acto seguido parecía disminuir instantáneamente la radiactividad del torio. Rutherford lo llamó gas *emanación de torio,* y encontró que el radio y el actinio emitían emanaciones similares; la del radio resultó ser un nuevo elemento, y se le llamó *radón*. En 1900, William Crookes halló que el uranio contenía pequeñas cantidades de una sustancia muy radiactiva, a la que llamó *uranio X,* y dos años después, Rutherford y Soddy obtuvieron una sustancia análoga, *torio X,* que extrajeron del torio.

Entonces se encontró un vasto número de otras sustancias radiactivas; la mayor parte de ellas presentaba radiactividad intensa, pero de corta duración; evidentemente, había de pagar sus grandes actividades con una vida corta.

En el año de 1902 Rutherford y Soddy hicieron un estudio general de la disminución de la potencialidad radiactiva, y hallaron que estaba regida por leyes muy sencillas. Ejemplares del mismo material radiactivo perdían siempre la misma fracción de su potencia en un tiempo dado; la radiactividad de un ejemplar emplearía tanto tiempo en caer desde 1 000 a 900 como posteriormente emplearía para caer de 100 a 90, y más tarde aún, desde 10 hasta nueve. En lenguaje matemático, la disminución era exponencial. Pero la cuantía de la disminución variaba enormemente de una sustancia a otra, porque el uranio perdería la mitad de su poder en unos 4 500 millones de años, el radio en 1 600 años aproximadamente, el radón en 3.8 días, y así sucesivamente, hasta el torio C′, que se reducía a la mitad de su poder quizás en 1/100 000 000 parte de un segundo. Ningún cambio en las condiciones físicas podía alterar estas tasas de disminución; parecía que el cambio provenía del interior de la sustancia, y que era de la naturaleza de explosión atómica o desintegración. De esta manera, un átomo tiene siempre la misma probabilidad de desintegración, cualesquiera que fueren su pasada historia o su estado presente. He aquí una ley natural de un género hasta entonces desconocido para la ciencia, cuyas consecuencias muy pronto se vería que eran inmensas. Desde Demócrito, pasando por Newton hasta el siglo XIX, había proclamado la ciencia que el presente estaba determinado por el pasado; la nueva ciencia del siglo XX parecía decirnos algo diferente: en los acontecimientos sometidos ahora a nuestra consideración, el pasado no ejercía aparentemente ninguna influencia sobre el presente, ni el presente sobre el porvenir.

Rutherford y otros estudiaron entonces en detalle la desintegración atómica, y hallaron que cualquier sustancia radiactiva pasaba a través de larga sucesión de cambios, alterando su naturaleza química, no de repente, sino poco a poco, pasando por estados muy radiactivos con mucha rapidez, y por estados menos radiactivos más lentamente, hasta que llegaba a un estado final en el cual era completa y permanentemente estable. El uranio, por ejemplo, pasaba a través de no menos que 14 transformaciones antes de terminar como un nuevo género de plomo que difiere del plomo ordinario en que tiene un peso atómico de 206 en lugar del ordinario de 207. Estos cambios van acompañados por la expulsión de rayos α, β o γ. La emisión de rayos β o rayos γ no alteraba apreciablemente la masa de un átomo, pero cuando se emitía una partícula α, el peso atómico, naturalmente, disminuía su cifra en cuatro unidades. De esta suerte, el uranio, que empezara con el peso atómico 238, pasaba por los pesos atómicos 234, 230, 226, 222, 218, 214 y 210, antes de terminar en plomo con el peso atómico 206.

Todos estos cambios radiactivos tenían lugar en el mismo sentido (el del peso atómico decreciente); no hay actividad alguna en sentido opuesto. Por consiguiente, la radiactividad no alienta el punto de vista, tan antiguo como Demócrito, de que no hay cambios en la naturaleza, sino mezclas y entremezclas de átomos permanentes; más bien habla de principios y fines, de un proceso ininterrumpido desde una creación hasta la muerte, de una evolución que tiene lugar en una finita duración en el tiempo. Además, aporta un medio de calcular esta duración.

La edad del universo. Se encontró que muchas rocas de la corteza terrestre contenían incrustadas en ellas pequeñas partículas de material radiactivo junto a varios productos de su desintegración. El análisis de las proporciones de estos productos reveló el tiempo durante el cual habían estado aprisionadas las

sustancias radiactivas en el interior de las rocas, de suerte que se podía hacer un cálculo del tiempo transcurrido desde que la Tierra se solidificó.

Los geólogos habían hecho ya su cálculo con varios procedimientos, como, por ejemplo, por la salinidad de los océanos. Los ríos transportan constantemente agua y sal al océano; el agua se evapora, pero no la sal, de suerte que el océano se hace continuamente más salado. De la actual salinidad del océano calculó el astrónomo Halley (p. 229) que la Tierra debe tener una edad de varios cientos de millones de años, y su estimación la confirmaron otros, basados en la importancia de la erosión en las montañas y de la sedimentación en los valles (la cantidad en que las montañas rebajan su altura y los valles se rellenan). Pero todos esos cálculos dependían de procesos cuya velocidad no era constante ni conocida exactamente. La radiactividad se presentó entonces regalando un reloj de marcha conocida e invariable. Se analizaron los productos radiactivos hallados en las rocas terrestres más antiguas, y se encontró que asignaban a estas rocas edades de 2 000 millones de años, aproximadamente, en tanto que una colección de meteoritos analizada por Paneth y sus colaboradores reveló edades superiores a 7 000 millones de años. Evidentemente, la edad del universo tenía que ser medida en miles de millones de años.

Esto planteaba una cuestión calurosamente debatida durante algún tiempo: el origen de la energía del Sol. Los antiguos probablemente no vieron nada sorprendente en la continua pérdida de energía del Sol; mas, cuando Helmholtz se halló frente al principio de la conservación de la energía, en 1857, se debió preguntar dónde hallaba el Sol la energía para tanta radiación. La única adecuada fuente de energía que pudo imaginar fue la contracción del Sol. Así como las pesas de un reloj al descender hacia el suelo proporcionan energía para la marcha continua del reloj, de manera análoga, pensó Helmholtz, la contracción

del Sol y el descenso de las capas superiores en dirección a su centro pueden proporcionar energía, para la emisión continua de la radiación. Pero lord Kelvin calculó que esta fuente de energía no podía producir energía más que para unos 20 millones de años de radiación, en tanto que los geólogos tenían seguridad, o así lo pensaban, de que el Sol había estado radiando, por lo menos, durante cientos de millones de años. La fundamentación radiactiva no sólo apoya con gran fuerza el punto de vista geológico, sino que, a la vez, proporciona una clave respecto de la posible fuente de energía. Porque un Sol constituido puramente por uranio radiaría durante mucho mayor tiempo que la calculada edad del Sol y, asimismo, más intensamente. Esto hizo pensar que la energía solar pudiera ser del mismo carácter general que la energía radiactiva, como se ha probado desde entonces que ocurre (p. 395).

La estructura del átomo. Estas propiedades radiactivas de la materia no sólo impulsaron a los físicos a revisar sus concepciones acerca de algunos muy fundamentales procesos de la naturaleza, sino que, de paso, les suministró una nueva herramienta de trabajo. Las partículas α eran, de hecho, proyectiles de magnitud y masa atómicas de extremada velocidad, y Rutherford comprendió que podían emplearse para explorar el interior del átomo. En 1911 aconsejó a dos de sus colaboradores en la investigación, Geiger y Marsden, que hicieran atravesar un fuego graneado de partículas α por una capa de gas de tal espesor que una buena proporción de estos proyectiles tuvieran probabilidad de chocar con un átomo. Así lo hicieron con resultados sensacionales y completamente inesperados. Se vio que la mayor parte de los proyectiles pasaba libremente a través del gas sin chocar absolutamente en nada, ni desviarse en sus trayectorias, derribando así de un solo golpe el cuadro de la edad de oro del átomo concebido como un trozo de materia duro y sólido; se veía entonces que el átomo consistía principalmente en es-

pacio vacío. Más inesperadamente aún, se halló que unas pocas partículas se desviaban de su trayectoria formando ángulos muy abiertos. Citando la frase de Rutherford, diremos: "Era casi tan increíble como si disparaseis una granada de 15 pulgadas (38 centímetros) contra una hoja de papel de seda, y del choque se volviera contra vosotros".[5]

Las desviaciones observadas estaban de acuerdo con una sencilla ley matemática, y de esto era posible deducir la estructura atómica que las había causado. Se halló que cada átomo debía contener un alma o "núcleo" pequeñísimo en tamaño, pero que contenía en sí casi toda la masa del átomo. Llevaba también consigo una carga de electricidad positiva que producía las desviaciones observadas en el bombardeo de partículas α, de suerte que su cuantía podía calcularse por el grado de las desviaciones. Además, como la carga total del átomo es nula, esta carga positiva debía neutralizar exactamente las cargas sumadas de todos los electrones del átomo, de suerte que puede calcularse el número de estos electrones. En la mayor parte de las sustancias se comprobó que es aproximadamente la mitad del peso atómico; ya hemos dado un ejemplo en el helio, de peso atómico 4, el cual tiene dos electrones en cada átomo. Esto llevó a una descripción "planetaria" del átomo; el núcleo macizo era como el Sol, a su alrededor hacían sus revoluciones los electrones igual que los planetas.

Posteriormente, en 1913, H. G. J. Moseley y otros descubrieron que el número de los electrones planetarios seguía una ley muy sencilla: si los elementos se ordenaban según sus pesos atómicos, el número de electrones de los átomos es, respectivamente, 1, 2, 3, 4, 5,… y así sucesivamente (la sucesión de números enteros). De esta manera, el hidrógeno, el más ligero de todos los átomos, sólo tiene un electrón en su átomo; el helio, el más ligero que le sigue, tiene dos; luego viene el litio con tres, el berilio con cuatro, y así sucesivamente. Estos números enteros

se llaman los *números atómicos* de los respectivos elementos. Al principio había unos pocos huecos en la sucesión de elementos conocidos, pero se fueron llenando rápidamente mediante el descubrimiento de nuevos elementos hasta un total de 92 conocidos, con números atómicos desde 1 (hidrógeno) hasta 92 (uranio). Muy recientemente, en 1940, este número se ha aumentado por el descubrimiento posterior de dos nuevos elementos, el neptunio y el plutonio, cuyos números atómicos son 93 y 94, a los cuales se añadieron otros dos de números atómicos 95 y 96, pero que no se anunciaron hasta el año 1946. En 1959 se llegó al 102. Cuando se descubrió la sencilla ley de los números atómicos, parecía al principio que el problema de la estructura del átomo estaba casi resuelto; pocos pudieron suponer cuántos obstáculos quedaban todavía por vencer.

RAYOS POSITIVOS. Las partículas catódicas no constituyen el único mecanismo para el transporte de la electricidad a través de un gas; hay allí también un chorro de portadores de cargas positivas que se mueven en sentido opuesto. Goldstein descubrió esto en 1886 por el sencillo artificio de hacer un agujero en el cátodo. Algunas de las partículas que de otro modo habrían terminado su trayectoria en el cátodo, pasaban entonces a través de éste y quedaban así aisladas para su estudio. En el año 1898, W. Wien midió las cargas y las masas de estos portadores por el método de las desviaciones eléctricas y magnéticas (p. 350). Cada partícula llevaba, según se comprobó, una carga positiva de igual magnitud, pero de signo contrario a la carga de un electrón, y tenía la misma masa que cualquiera de los átomos que estaban en el tubo de descarga; podían medirse las masas de estos átomos anotando las desviaciones que experimentaban en campos eléctricos y magnéticos conocidos. Por tanto, estos portadores eran sencillamente átomos a los cuales se les habían quitado electrones: se les llamó *iones positivos*.

Se hizo fácil entonces ver cómo se transporta la electricidad a través de un gas. Las fuerzas eléctricas que originan la corriente impulsan las cargas atómicas positivas y negativas en sentidos opuestos, hasta que los electrones se desprenden de los átomos, y quedan como iones positivos. Entonces los electrones y los iones positivos proceden a moverse en sentidos diferentes bajo la influencia de las fuerzas eléctricas: los electrones cargados negativamente desde el cátodo al ánodo, y los iones positivos en sentido opuesto, del ánodo al cátodo. Las dos corrientes de partículas forman los rayos catódicos y los rayos positivos, respectivamente.

Isótopos. El estudio de los rayos positivos había proporcionado un nuevo medio de determinar las masas de los átomos, y de aquí los pesos atómicos de los elementos, y pronto se comprobó que este medio era mucho más exacto que el antiguo método empleado por los químicos. En 1910, sir J. J. Thomson lo empleaba para medir las masas de los átomos de varios cuerpos simples. Si en un haz de rayos positivos las partículas fueran exactamente iguales, y todas se movieran exactamente con la misma velocidad, entonces, de igual modo, todas las partículas se desviarían por efecto de fuerzas eléctricas y magnéticas, de tal suerte que el haz permanecería compacto y, cayendo sobre una placa fotográfica, marcaría en ella sencillamente un punto. En realidad, no es fácil eliminar diferencias de velocidad, y por tal causa el haz se ensancha y deja impresionada en la placa fotográfica una parábola.[6] Pero cuando Thomson impresionó un haz de átomos de neón, se encontró con dos parábolas en vez de una. Los químicos habían dado el peso atómico del neón como 20.2. Se comprobó que estas dos parábolas representaban pesos atómicos de 20.0 y 22.0, siendo la primera parábola aproximadamente nueve veces tan fuerte como la segunda. De esto se dedujo que el neón no estaba formado por átomos enteramente iguales, sino que era una mezcla de dos sustancias dife-

rentes de pesos atómicos 20.0 y 22.0. A estos grupos de sustancias les dio Soddy el nombre de *isótopos* ἰςο-τόπος en vista de que ocupaban los mismos lugares en la tabla de los elementos químicos; esto es, que tenían el mismo número atómico.

Esto lo acogió con gran entusiasmo F. W. Asten, del Trinity College de Cambridge, el cual realizó notables mejoras en aparato y método, y luego procedió a analizar gran número de elementos en busca de isótopos. En primer lugar descompuso el cloro, de supuesto peso atómico $35^{1}/_{2}$, en una mezcla de isótopos de pesos atómicos 35 y 37, estando la cantidad de éstos en relación de 3 a 1, de manera que resultó un peso atómico medio de $35^{1}/_{2}$. Después de esto, él mismo y otros continuaron sus hallazgos en torrente continuo hasta estudiar casi todos los elementos y descubrir sus isótopos, y medir con precisión sus pesos atómicos. Había quedado descartada la antigua teoría de que todos los átomos del mismo elemento químico se habían fundido en el mismo molde. Cada elemento tiene un definido número atómico que determina sus propiedades químicas, pero la mayor parte de los elementos están constituidos por una mezcla de átomos de diferentes pesos atómicos.

Se halló que si el peso atómico del oxígeno se considera que es 16, entonces la mayor parte de los pesos atómicos caen muy próximos a números enteros. El hidrógeno tiene un peso atómico de 1.00837, con isótopos de pesos 2.0142 y 3.016; el neón, tres isótopos de pesos 19.997, 21 (aproximadamente) y 21.995; mientras que el kriptón está formado por una mezcla de isótopos de pesos 77.93, 79.93, 81.93, 82.93, 83.93 y 85.93. Y la mayor parte de los elementos nos cuentan un cuento semejante.

Hemos visto que la hipótesis de Prout, de que todos los átomos eran agregaciones de simples átomos de hidrógeno, había caído en desgracia cuando se encontró que los pesos atómicos no eran todos números enteros exactos, y así debió ser: nadie podría haber pensado que el cloro fuera un conglomerado de

$35^1/_2$ átomos de hidrógeno. La nueva determinación de pesos atómicos hizo mucho en contra de esta objeción. Porque, si bien los nuevos pesos atómicos no llegaban a ser números enteros exactos, las pequeñas diferencias manifestadas podrían explicarse fácilmente. Hemos visto (p. 339), que el principio de relatividad requiere que todo cambio de energía vaya acompañado de un cambio de masa. Si la distancia entre dos cargas eléctricas cualesquiera sufre un cambio, la energía de la combinación cambia también y, por consiguiente, su masa. En tal caso, la masa de cualquier átomo cambiaría si sus constituyentes estuvieran separados a gran distancia unos de otros, y si esto sucediere con todos los átomos, sus pesos atómicos podían, de manera comprensible, llegar a ser números enteros exactos, de suerte que podía de nuevo mantenerse la hipótesis de Prout.

Según Rutherford, el átomo del hidrógeno consiste en un solo electrón cargado negativamente y un núcleo cargado positivamente, conocido con el nombre de *protón,* el cual lleva una carga igual pero contraria a la del electrón, siendo *nula* la carga total del átomo. Durante algún tiempo se pensó que el átomo podía estar integrado únicamente por protones y electrones, necesariamente iguales en número, puesto que la carga total de cada átomo es nula. Si así fuere, todo átomo contendría los ingredientes de algún número entero de átomos de hidrógeno, lo cual es justamente lo que propugnaba Prout. Pero esto conducía a serias dificultades en relación con las propiedades magnéticas del núcleo, y pronto empezaron a aparecer otras partículas, además del protón y del electrón.

La transmutación de los elementos. Hemos visto que los alquimistas dedicaron siglos de trabajo para intentar transmutar los elementos, en general con el propósito lucrativo de cambiar en oro los metales no preciosos. Cuando sus esfuerzos no consiguieron éxito alguno, sus propósitos cayeron en descrédito, e incluso fueron objeto de mofa como imposible realización. Los

átomos, pensábase entonces, eran estructuras permanentes e inalterables; como eran entonces, lo habían sido desde que fueron hechos en la Creación, y así permanecerían hasta el final de los tiempos.

Pues bien, en el año de 1919, Rutherford realizó un experimento que hizo época, en el cual demostró que los propósitos de los alquimistas no tenían nada de fantásticos, sino que eran enteramente realizables. No solamente esto, sino que el modo de cambiar la naturaleza química de una sustancia era asombrosamente sencillo: bombardéese la sustancia con partículas α. Rutherford eligió primeramente el nitrógeno para bombardearlo y descubrió que cuando una partícula α (o núcleo de helio) de peso atómico 4, producía un impacto en un núcleo de nitrógeno de peso atómico 14, el núcleo de este último arrojaba de sí una pequeña partícula que parecía ser probablemente un núcleo de hidrógeno. En abril de 1925, P. M. S. Blackett, que trabajaba entonces en el laboratorio de Rutherford, preparó el bombardeo para que tuviera lugar en una cámara de niebla o de Wilson (p. 350). En esta cámara puede hacerse que una partícula electrizada en movimiento deje tras de ella una estela de condensación, algo semejante a la estela de condensación que un avión deja tras de sí en las capas superiores de la atmósfera. Esta estela puede fotografiarse, de tal manera que puede registrarse la trayectoria de la partícula en movimiento. En muchos miles de bombardeos halló Blackett que los núcleos simplemente rebotaban de uno a otro igual que otras tantas bolas de billar, pero hubo unos pocos casos en los cuales la combinación de los núcleos de nitrógeno y de helio se transformaban en un núcleo de oxígeno de peso atómico 17 (uno de los isótopos del oxígeno) y un protón o núcleo de hidrógeno de peso atómico 1. Los dos núcleos de las masas 14 y 4 habían aparentemente cambiado entre ellos tres protones y un electrón, y surgían como núcleos de masas 17 y 1. El procedimiento parecía en cierta

manera sugerir el proceso radiactivo, pero difería en que se podía manejar; en vez de esperar que el gatillo se disparara por sí mismo, el experimentador lo ponía en marcha por el impacto de la masa de la partícula α, y salía el tiro. Además, hubo las diferencias siguientes: las partículas α eran absorbidas en vez de ser emitidas, y se emitían protones que nunca lo fueron en las transformaciones radiactivas. Este experimento abrió un vasto campo de investigación, que en los momentos actuales está muy lejos de agotarse, pero hay pocos tipos de transmutación entre los elementos más simples que no hayan sido estudiados en detalle.

El neutrón. En 1931, Bothe y Becker eligieron para bombardeo el ligero elemento que es el berilio, y comprobaron que emitía una radiación sumamente penetrante. Como no pudo desviarse por fuerzas magnéticas, se pensó al principio que se trataba de rayos γ. Al año siguiente, James Chadwick, que entonces trabajaba en el Laboratorio Cavendish, pero que ahora es profesor en Liverpool, probó que consistía en partículas materiales de masa poco más o menos igual a la del átomo de hidrógeno, pero que no lleva carga consigo. A estas partículas las llamó *neutrones.* Constituían más eficaces proyectiles que las partículas α, puesto que, por no estar cargadas, no eran repelidas por los núcleos atómicos.

Se pensó desde luego que podrían ser constituyentes normales de los núcleos atómicos. Un núcleo podía contener protones iguales, en número, al número atómico del elemento, dando de este modo la debida carga al núcleo en unión de suficiente número de neutrones para que la masa alcanzara el peso atómico del elemento. La adición o separación de neutrones daría, por supuesto, isótopos. Por ejemplo, los núcleos de los tres isótopos de hidrógeno, cuyos pesos atómicos son 1, 2 y 3, consistirían en un simple protón unido a 0, 1 y 2 neutrones, respectivamente.

La prueba fehaciente experimental confirmó pronto esta hipótesis. Chadwick y Goldhaber rompieron el núcleo del átomo de hidrógeno de peso atómico 2 (llamado *deuterón*) en un protón y un neutrón, al mismo tiempo que Szilard dividió el núcleo del berilio de peso atómico 9 en un núcleo de peso atómico 8 y un neutrón.

Todos éstos no son más que simples ejemplos de un proceso muy general conocido como *fisión nuclear:* división de un núcleo en partes más pequeñas. Fermi y sus colegas, en Roma, bombardearon núcleos de uranio con neutrones, y creyeron que habían obtenido nuevos elementos radiactivos más pesados que el uranio, hasta que Hahn y Strassman probaron en 1938 que habían meramente roto el núcleo de uranio en dos partes. Frisch y Meitner enunciaron que una parte sustancial de la masa del núcleo del uranio original debió ser transformada en energía, y Frisch confirmó esto demostrando que los fragmentos de los núcleos despedazados escapaban con velocidades explosivas.

Se abrió un nuevo capítulo en 1939, cuando la fisión nuclear iba acompañada de una emisión de neutrones. Esto era importante porque si hubiera más neutrones emitidos que absorbidos, todo neutrón nuevamente emitido podía obrar como bombardero, produciendo todavía más neutrones, y así indefinidamente, produciendo, de esta manera, una fuerza explosiva devastadora. Se halló que era más sencillo conseguir este efecto bombardeando el núcleo de un isótopo del uranio, raro, de peso atómico 235.

He aquí el origen de esa técnica que no ha llegado a producir hasta hoy más que la bomba atómica, pero que perfectamente podemos concebir que conduzca a un desarrollo industrial del mayor valor. La transformación consiste en que parte de la masa del núcleo se convierte directamente en energía, y ésta podrá quizás emplearse como fuente de trabajo útil, de manera pare-

cida a como usamos ahora magnitudes de energía menores liberadas por la combustión de la hulla o la inflamación de los vapores de petróleo.

La energía acumulada en dos partículas cargadas eléctricamente depende de la distancia que las separa, variando inversamente con la distancia; si reducimos la distancia entre dos partículas a una millonésima, entonces aumentamos la energía que podemos obtener de ellas en un millón de veces más. Ahora bien, cuando se quema hulla o se queman los vapores de petróleo o se hace estallar nitroglicerina, estamos, de hecho, dando una nueva disposición a las partículas cargadas que están separadas a distancias moleculares, quizás a 10^{-7} ó 10^{-8} centímetros. Mas, al llevar a cabo la fisión nuclear, estamos dando una nueva disposición a las partículas que están separadas solamente a distancia nuclear, y éstas son únicamente del orden de 10^{-13} o 10^{-14} centímetros. Como sólo están a una millonésima de la distancia molecular, la acumulación de energía disponible es un millón de veces mayor. De esta manera podemos esperar que una bomba atómica haga poco más o menos un millón de veces tanto daño como un peso igual de explosivo de gran potencia y, asimismo, esperar un proporcional aumento de fuerza si la energía nuclear puede en cada caso remplazar la energía química para utilizarla en propósitos pacíficos.

Radiación cósmica. Hasta ahora, nuestro relato de la física moderna ha sido en su mayor parte la del descubrimiento de nuevas radiaciones. Nos toca ahora describir todavía otro tipo de radiación que vino a nuestro conocimiento en los primeros años del presente siglo. Hacia 1902, cierto número de experimentadores hallaron que sus instrumentos eléctricos se descargaban sin ninguna razón aparente, y supusieron que la causa debía de ser algún tipo de radiación hasta entonces desconocida. Ésta parecía encontrarse presente en todas partes y tenía un poder de penetración más grande que cualquier tipo de radia-

ción entonces conocido, porque ningún grosor metálico podía defender los instrumentos contra sus efectos. Al principio se pensó que provenía de la Tierra; pero Göckel, Hess, Kolhörster, y más tarde Millikan y sus colegas de Pasadena, hallaron que sus instrumentos se descargaban aún más rápidamente cuando se depositaban en globos, en tanto que se producía el efecto contrario si se transportaban a minas profundas o se sumergían profundamente en agua libre de radio. Quedó perfectamente aclarado que esta radiación debe venir a la atmósfera de la Tierra desde el exterior.

La radiación no podía provenir de las estrellas, porque si así fuere, el Sol habría proporcionado la contribución máxima; no obstante, en la noche se recibía exactamente la misma cantidad de radiación que en el día. Tenía todo el aspecto de que esta radiación provenía de algún proceso cósmico general, y por esta causa se da a conocer como *rayos cósmicos*.

La radiación es mucho más penetrante que cualquier otro tipo de radiación conocida, porque pasa a través de metros de plomo. Esto la hace prácticamente indestructible. En cuanto a la densidad media de materia existente en los espacios, es tan débil (aproximadamente 10^{-28} gramos por centímetro cúbico) que esa radiación puede propagarse durante miles de millones de años antes de que se encuentre tanta materia como puede haber en una hoja de plomo de un milímetro de espesor. Como el universo probablemente tiene sólo una edad de algunos miles de millones de años, significa esto que casi todos los rayos cósmicos que hayan sido generados, cuando quiera que sea, están aún propagándose por el espacio. Regener comprobó que recibimos tantos de estos rayos como la luz y el calor que nos vienen de todas las estrellas, exceptuando el Sol; ellos rompen, poco más o menos, por segundo, 10 átomos en cada pulgada cúbica de aire. Considerando la media en el total de los espa-

cios, es probablemente el género de radiación más común en todo el universo.

En los años siguientes al descubrimiento de tales rayos hubo no poca discusión respecto de su naturaleza; ¿consistían en partículas cargadas, o en perturbaciones electromagnéticas, o en alguna cosa diferente de unas y otras? Era inútil ensayarlos en el campo magnético ordinario de un laboratorio, porque cuando llegaban al laboratorio ya habían atravesado totalmente la atmósfera de la Tierra, despedazando todo átomo que encontraban en su camino, y de esta suerte mezclándose con vastos despojos de su propia creación. El único campo magnético que podría utilizarse para proporcionar una prueba era el mismo de la Tierra, porque los rayos pasaban a través de él antes de meterse en la atmósfera. Este campo no desviaría las ondas electromagnéticas y, por tanto, si los rayos consistían en éstas, caerían de manera igual sobre toda la superficie de la Tierra. Por otra parte, si los rayos consistieran en partículas cargadas, éstas se desviarían por el campo magnético terrestre y, por tanto, caerían de modo desigual sobre las partes diferentes de la superficie de la Tierra, y la desigualdad en su incidencia señalaría alguna referencia respecto del campo magnético terrestre.

A partir del año 1938, Millikan y sus colaboradores en el Instituto de Tecnología de Pasadena estuvieron enviando expediciones a diferentes partes de la superficie de la Tierra para medir la fuerza de esta radiación; encontraron que no es uniforme. Millikan y Neher interpretaron las observaciones en el sentido de que mostraban que, por lo menos, 60% de los rayos deben consistir en partículas cargadas, moviéndose cada una con la energía que adquiere un electrón atravesando el trayecto de una caída de voltaje de dos a 15 millares de millones de voltios. Hicieron suposiciones sobre el origen de esta energía.

Hemos visto ya que la masa de una partícula aumenta a medida que aumenta también su velocidad de movimiento, de ma-

nera que un electrón que se mueva suficientemente rápido, puede tener la masa de un átomo completo. No se trata de una suposición meramente fantástica, ni siquiera de una deducción de la teoría, porque Lauriston y Fowler han descubierto que, en el laboratorio, un átomo completo puede transformarse en un par de partículas que se muevan a tal velocidad que su masa combinada sea igual a la del átomo original. Millikan imaginó que la radiación cósmica podía contener partículas de este tipo, que estarían dotadas de masas atómicas por su enorme velocidad de movimiento. En 1943, Millikan, Neher y Pickering hallaron que la radiación observada podría atribuirse al fraccionamiento de átomos de helio, nitrógeno, oxígeno y silicio (no se trata de un surtido de átomos escogidos al azar, sino de algunos de los más comunes átomos que hay en el espacio). Si al fin se prueba que éste es el origen de los rayos cósmicos, proporcionará un brillante ejemplo de la transformación de la materia en radiación, aunque no podamos formar idea alguna respecto de cómo y por qué tiene lugar esta transformación. Ya hemos visto que en la bomba atómica se utiliza una transformación menos completa, y en breve trataremos de otro ejemplo sacado de la radiación del Sol y las estrellas.

OTRAS PARTÍCULAS. La gran potencia de penetración de la radiación cósmica significa un alto poder destructivo, y, en efecto, los rayos cósmicos rompen todo núcleo atómico cuando chocan con éste. Si el choque se produce en una cámara de niebla o de Wilson, los despojos de los núcleos despedazados pueden examinarse fotografiando las estelas de condensación de los varios constituyentes (p. 357). En 1932, Karl Anderson, trabajando en el Instituto de Tecnología de Pasadena, halló que estos despojos contenían partículas de un género hasta entonces desconocido, que llevaba consigo la carga de un protón, pero sólo la masa de un electrón. En efecto, eran electrones cargados positivamente; Anderson los llamó *positrones.*

Éstos tienen efímera existencia; se adhieren a los electrones ordinarios casi tan pronto como nacen y desaparecen en un chispazo de radiación, siendo la energía de este chispazo, por supuesto, tal, que su masa es igual a las masas combinadas del positrón y del electrón. Blackett y Occhialini, del Laboratorio Cavendish, sugirieron en 1933, y Anderson lo comprobó inmediatamente, que este proceso era reversible; así como el positrón y el electrón mueren a pares, de igual manera nacen por parejas, y, de esta suerte, la materia se crea de la energía.

Hasta entonces se conocían estos electrones positivos únicamente como productos de la radiación cósmica que venía de las profundidades del espacio; pero en 1934, Joliot consiguió en el laboratorio que un núcleo radiactivo despidiera partículas análogas.

En 1937 Anderson comprobó que los despojos producidos por los rayos cósmicos contenían, además, otro nuevo género de partículas: el *mesitrón* o *mesón*. Tiene éste la misma carga que el electrón, pero posee una masa que se ha estimado diferentemente, desde 40 hasta 500 veces la del electrón, y es, por tanto, intermedia entre las masas del electrón y del protón. Está muy lejos de la certeza que su masa sea siempre la misma; puede haber muchos géneros de mesones.

Todas estas partículas diferentes parecen emerger de los núcleos atómicos, los cuales, por consiguiente, parecen ser mezclas de todas estas clases de partículas. Mas no sabemos hasta dónde tengan estas partículas existencias permanentes e independientes. Anderson ha pensado que el neutrón pudiera no ser una partícula fundamental, sino un protón y un electrón combinados (una especie de átomo de hidrógeno en colapso); Rutherford y Aston hallaron que su masa es aproximadamente una décima parte de 1% mayor que las masas combinadas de un protón y un electrón. Dicho de otro modo, el protón y el neutrón podrían ser la misma partícula fundamental en estados di-

ferentes, cada una transformándose en la otra mediante la emisión de un electrón o un positrón. Esta emisión, por supuesto, produce un retroceso, y para cumplir con los principios de la conservación de la energía y del momento, deben emitirse otras partículas al mismo tiempo; las partículas hasta hace poco hipotéticas que se necesitan para esto se llaman *neutrino* y *antineutrino*.

Ante todo esto, puede ser trivial el intento de asignar cualquier especificación precisa al núcleo; no es gran materia de discusión si una taza de té consiste en té con leche endulzado con azúcar o si es té azucarado blanqueado con leche.

Teoría de los *quanta*

La teoría cinética de los gases fue principalmente creación del siglo XIX. Hacia el fin de este siglo se explicaban con ella la mayor parte de las propiedades de un gas, describiéndolo como una multitud de diminutas moléculas duras lanzándose por el espacio y en frecuentes choques unas con otras, saltando después de cada choque en nueva trayectoria igual que bolas de billar que se movieran en tres dimensiones.

Pero esta concepción tenía sus dificultades. Era difícil de comprender por qué las moléculas lanzándose y rebotando podían seguir haciéndolo, prácticamente, por siempre. Las bolas de billar no lo harían así. Acaban su marcha sobre la mesa porque pierden energía de movimiento en cada choque con otra bola o con la banda, que se transforma en energía calorífica, la cual es la energía de las vibraciones internas de la bola. ¿Por qué las moléculas de un gas no transforman sus energías de manera análoga?

Sería una solución suponer que las moléculas no vibran; pero esto no se podía admitir sino forzando las hipótesis. El es-

pectro de un gas se interpreta generalmente como prueba de que sus átomos o moléculas estaban vibrando, exactamente igual que el sonido de una campana nos dice que la campana está vibrando. Y más adelante, cuando se halló que el átomo está integrado por un gran número de componentes eléctricos, pareció absurdo suponer que no ocurrieran vibraciones internas en ellos.

La dificultad la puso de manifiesto con toda agudeza un teorema matemático conocido como el *teorema de equipartición de la energía*. Éste demostraba que todos los movimientos posibles de las moléculas de un gas pueden considerarse como bocas esperando ser alimentadas con la energía y compitiendo por tomar cualquier energía utilizable. Cuando dos moléculas chocan, hay energía transferida de una a otra, y el teorema demostraba que después de un gran número de choques, la energía queda distribuida en proporción definida. Habría en cada molécula (por término medio, tomado para un corto periodo de tiempo), tres unidades de energía por su movimiento a través del espacio, dos unidades por cada una de sus vibraciones internas, y cero, una o tres por su rotación, según su forma y estructura. Entonces, si hubiera muchas vibraciones internas, la mayor parte de la energía iría a alimentar éstas. En realidad, el experimento demostró que la mayor parte de ella la consumía el movimiento del cuerpo a través del espacio; en las moléculas más simples: helio, neón, etc., las cuales son simples átomos, todo marchaba de este modo. Evidentemente, algo andaba mal, y como el teorema de equipartición era una deducción lógica del sistema de mecánica newtoniano, la falla parecía estar en éste.

La radiación de un cuerpo al rojo, por acción del fuego, presentaba la misma dificultad en forma ligeramente distinta. El teorema de equipartición prescribía que la radiación de tal cuerpo debía consistir casi enteramente en ondas de la longitud

de onda más corta posible. El experimento demostró que el caso era exactamente lo contrario.

El primer turno para acabar con aquel atasco le tocó a Max Planck, profesor de la Universidad de Berlín, y posteriormente del Instituto del Emperador Guillermo. En un documento que hizo época, que publicó en 1900, imaginaba que toda materia consistía en vibradores, teniendo cada uno su propia frecuencia de vibración particular,[7] y emitiendo radiación de esa frecuencia, exactamente igual que una campana emite sonido correspondiente a su propia frecuencia de vibración. Esto concordaba por completo con las ideas corrientes, pero Planck presentó entonces la chocante suposición de que los vibradores no emitían energía de manera continua, sino por una serie a modo de chorros instantáneos. Tal suposición estaba en flagrante oposición a las leyes electromagnéticas de Maxwell y a la mecánica newtoniana; eliminaba de la naturaleza la continuidad e introducía una discontinuidad respecto de la cual no había ninguna prueba fehaciente.

Cada vibrador, por hipótesis, tenía una cierta unidad de radiación asociada con él y podía emitir radiaciones únicamente en unidades completas. Jamás podía emitir una fracción de unidad, de suerte que la radiación se suponía que era atómica. Tal hipótesis condujo naturalmente a resultados muy diferentes de la mecánica newtoniana; sin embargo, Planck consiguió demostrar que la naturaleza estaba de su parte. Su teoría predijo la emisión observada exactamente en un cuerpo calentado.

Planck describió sus unidades de radiación con el nombre de *quanta.* La cantidad de energía de cualquier unidad dependía del vibrador, cuya unidad vino a ser igual a la frecuencia de las vibraciones multiplicada por una constante, *h,* que se conoce generalmente como la constante de Planck; se ha comprobado que ésta es una de las constantes fundamentales del universo (como la carga de un electrón o la masa de un protón). A través

de todos los cambios que ha experimentado la teoría de los *quanta* (y son muchos), *h* se ha mantenido firme como una roca, pero hoy día la asociamos con la radiación más que con los vibradores.

En 1905 Einstein intentó representar la teoría de modo que entrara por los ojos y describió la radiación como un vuelo de balas individuales de energía, a las cuales llamó *flechas de luz*. Se suponía que se propagaban con la velocidad de la luz en línea recta, llevando cada una justamente un *quantum* de energía, hasta que, cayendo sobre materia, ésta lo absorbía.

Esto, como señaló inmediatamente Lorentz, estaba esparciendo a todos los vientos la teoría ondulatoria y todos sus triunfos; pero el cuadro tenía mucho en su favor. Cuando la luz ultravioleta, los rayos X o rayos γ atravesaban un gas, rompían algunos de sus átomos, transformándolo de esta suerte en conductor de electricidad. Podría anticiparse que el número de átomos rotos debía de ser proporcional al aumento de fuerza de la radiación que lo había atravesado. En realidad, el número hallado depende mucho más de la frecuencia de la radiación. Radiación débil de alta frecuencia puede romper gran número de átomos, mientras que intensa radiación de baja frecuencia puede no romper absolutamente ninguno, exactamente igual que ocurre con la actividad fotográfica: poquísima luz solar velará la película, en tanto que buena cuantía de luz roja (que es de baja frecuencia) no la daña en absoluto. Esto se explica inmediatamente si describimos la radiación de alta frecuencia, según las ideas de Planck, como balas macizas, y la radiación de baja frecuencia como tiro corto. Si un *quantum* tiene energía suficiente para romper el átomo que halla en su camino, así lo hace, y el electrón liberado lleva consigo todo residuo de energía en la forma de energía de movimiento. En realidad, se ha comprobado que los electrones liberados se mueven precisa-

mente a las velocidades requeridas por este modo de concebir los hechos.

Niels Bohr. En 1913 dio otro gran paso adelante Niels Bohr, que es ahora director del Instituto de Espectroscopia de Copenhague. Cuando la luz de un gas incandescente ha pasado por un espectroscopio y se le analiza, se descubre que su espectro presenta una serie de líneas, cada una de ellas correspondiente a una frecuencia totalmente definida. Ritz demostró que dichas frecuencias son las diferencias de otras que presumiblemente eran más fundamentales; si estas últimas fueran *a, b, c,* …, entonces las frecuencias observadas en el espectro serían *a* − *b, b* − *c, a* − *c, ...*

No obstante, imaginó Bohr que debe de haber ahí algo aún más fundamental, a saber, las cantidades *ha, hb, hc,* …, que son sumas de energía. Su magistral idea central fue que un átomo sólo podía permanecer estable en los estados en que la energía tenía uno u otro de estos valores, pero que podía pasar súbitamente de un estado cualquiera de ellos a otro de energía inferior, arrojando fuera de sí en este proceso un *quantum* de energía. Por ejemplo, si la energía decaía desde *ha* hasta *hb,* el átomo emitiría radiación de energía *h*(*a* − *b*)*,* y ésta, de acuerdo con las ideas de Planck, constituiría un *quantum* de frecuencia *a* − *b,* que era una de las frecuencias observadas en el espectro.

A continuación trató Bohr de explicar esta concepción mediante un estudio del átomo de hidrógeno, al cual atribuyó, con Rutherford, un protón y un electrón simple en movimiento de revolución alrededor de aquél. Pensó que las posibles órbitas eran aquellas en las cuales el momento angular era un número entero múltiplo de *h* y halló que los valores resultantes de *ha, hb,* …, conducían precisamente al espectro observado del hidrógeno. Este espectro, que había desafiado a los hombres de ciencia durante tanto tiempo, parecía haber revelado su secreto inmediatamente mediante los nuevos conceptos de la teoría de

los *quanta.* Bohr amplió después su investigación al espectro del helio con resultados completamente satisfactorios; pero se halló que su teoría fallaba para los espectros de átomos más complejos que el helio.

Estas ideas nuevas dieron paso a la incluso más seria objeción, en opinión de muchos, de que eran incompatibles con la teoría ondulatoria de la luz.

HEISENBERG, BORN Y JORDAN. Pocos progresos se consiguieron hasta 1925, cuando dieron un gran paso adelante Werner Heisenberg, que había trabajado con Bohr en Copenhague y fue después profesor de física en la Universidad de Leipzig, y Max Born, el cual, después de ser profesor en Berlín, Fráncfort y Gotinga, llegó a ser profesor de filosofía natural en la Universidad de Edimburgo. Imaginaba Heisenberg que las fallas de la teoría de Bohr deben de tener por causa deficiencias en su descripción del átomo. Cuando se rompía un átomo salían de él electrones, pero estos integrantes pueden muy bien haber cambiado sus atributos en el proceso de la rotura; el electrón sujeto dentro del átomo podía ser algo totalmente diferente del electrón libre en el espacio. De acuerdo con esto, Heisenberg prescindió de todas las suposiciones no comprobadas referentes a la existencia de partículas, *quanta* de energía, ondas luminosas, etc., que no fueran observables, y se concentró sobre las "observables", cuya existencia no ofrecía duda; no eran éstas sino líneas del espectro, cuya frecuencia e intensidad podía medirse. Siguiendo las líneas de este razonamiento de Heisenberg, Born y Jordan idearon un sistema de leyes que concordaran en todo con las observaciones de espectros atómicos. Este sistema de leyes se conoce generalmente como *mecánica de matrices.*

El álgebra ordinaria opera con sencillas cantidades corrientes, a las cuales representa con sencillos símbolos, como *x, y, z.* Si un grupo de cantidades está íntimamente relacionado, puede a veces ser conveniente operar con el grupo entero *en bloque,*

representándolo con una sola letra. Un grupo de género especial, que no hace falta especificar ahora, se denomina matriz. Cierto número de matemáticos había estudiado las propiedades de las matrices mucho tiempo antes de que fuera reconocida la importancia de ellas en la física atómica, y habían formulado reglas para operar con ellas. Por ejemplo, si p representaba el grupo a_1, b_1, c_1, y q representaba el grupo a_2, b_2, c_2, …, es evidente que se debe tomar $p + q$ para representar el grupo $a_1 + a_2$, $b_1 + b_2$, $c_1 + c_2$, ... De igual modo, hay convenciones acerca del significado de $p - q$, pq, p^2, $1/p$, y así sucesivamente.

Se dio un gran paso cuando Heisenberg, Born, Jordan y otros demostraron que en la escala atómica la naturaleza procedía de acuerdo con leyes de forma newtoniana pero, por otra parte, en que las cantidades algebraicas simples de Newton tenían que sustituirse por matrices. Si las coordenadas generalizadas y los momentos que aparecen en las ecuaciones canónicas (p. 273) se sustituyen con matrices adecuadas, las leyes que de este modo se obtienen se nos muestran rigiendo el total de la física atómica. El plan de Bohr había consistido en mantener la partícula-electrón y modificar la mecánica newtoniana; Born y Jordan mantuvieron la mecánica newtoniana (por lo menos en la forma) y modificaron la partícula-electrón, sustituyéndola por algo que era desconocido, pero que sería, ciertamente, más complejo que una simple partícula. Este algo desconocido sólo podían especificarlo matemáticamente. La mecánica newtoniana era válida hasta llegar a los límites del átomo, pasados los cuales dominaba la mecánica del *quantum.* En el espacio libre exterior del átomo, y asimismo en los confines exteriores al átomo, el nuevo electrón quedaba reducido a una simple partícula, y el nuevo sistema de Heisenberg, Born y Jordan se hacía idéntico al primitivo esquema de Bohr, reduciéndose ambos a la mecánica newtoniana.

Se veía entonces que la materia debe ser algo más complicado que una colección de partículas. La teoría de Bohr fue el intento final para interpretarla como partículas, pero se había puesto de manifiesto que para explicar la actividad interna del átomo se necesitaba un instrumento más perfecto. Se imponían nuevas concepciones, pero éstas no permitían su representación en términos mecánicos; no podían ser representadas en espacio y tiempo de ninguna manera. La hipótesis de Demócrito de que podía explicarse el universo como un vacío habitado por partículas había servido bien a la ciencia durante 2 400 años; pero había llegado el momento de desecharla, y con el fracaso de la teoría de Bohr la concepción del universo como una estructura de partículas existentes en el espacio y en el tiempo tenía que despedirse de la ciencia.

De Broglie. Mientras todo lo anterior iba avanzando se hacían otros ensayos, en direcciones enteramente diferentes, para descubrir el verdadero plan de las leyes naturales. En particular, Louis de Broglie, de París, había dado nuevo giro al estudio en 1924, guiado por una analogía óptica. Reflexionando sobre la manera en que había cambiado la primitiva teoría de la óptica, la cual consideraba la luz como rayos que se propagan en líneas rectas a través del espacio, al verse obligada a dar paso a la más perfeccionada teoría de las ondulaciones, pensó que la teoría del electrón en movimiento podía perfeccionarse de igual manera. Empezó a considerar al electrón en movimiento como un tren de ondas, y demostró que los principios de la teoría de los *quanta* daba la posibilidad de asignar frecuencias y longitudes de onda a las ondulaciones. En 1927, Davisson y Germer, casi accidentalmente, dejaron caer un chorro de electrones de gran velocidad sobre la superficie de un cristal y observaron que los electrones se difractaban y que procedían como los rayos X en condiciones semejantes. Como se creía que los rayos X consistían en ondas, esto sugirió que hay algo en el electrón

de naturaleza ondulatoria. En el año siguiente, G. P. Thomson, hijo de sir J. J. Thomson, y por entonces profesor de filosofía natural en la Universidad de Aberdeen, pasó un chorro de electrones a través de una película muy fina de metal y observó análogo efecto, siendo la longitud de onda y la frecuencia de ondas exactamente las exigidas por la teoría de los *quanta.* Comenzó a considerarse la materia como si estuviera constituida por ondulaciones más que por partículas.

Schrödinger. En 1926, Erwin Schrödinger, profesor entonces en la Universidad de Berlín, aplicó las mismas ideas al movimiento de un electrón dentro de un átomo, sustituyendo un tren de ondas por cada uno de los electrones supuestos por la teoría de Bohr. Esta teoría señalaba que un electrón se movía sólo en órbitas determinadas dentro del átomo, y Schrödinger demostraba ahora que las supuestas órbitas eran las que contenían exactamente un número entero de ondas completas, de suerte que el patrón de onda las juntaba exactamente para completar la circunferencia. De esta manera llegó Schrödinger a presentar una especificación matemática que parecía explicar completamente todos los espectros conocidos. Hasta entonces las ondas habían sido únicamente abstracciones matemáticas; su interpretación física quedaba ahora explicada por el *principio de incertidumbre o indeterminación* que Heisenberg acababa de introducir.

El principio de incertidumbre. Es lugar común en la ciencia que no se pueden obtener buenos resultados de instrumentos malos; cuanto más precisos son los instrumentos de que disponemos, más exactos pueden ser los resultados. Si tuviéramos a nuestra disposición instrumentos perfectamente precisos, seríamos capaces, en principio, de trazar un cuadro exacto del universo material; podríamos, por ejemplo, decir: "Aquí, en este exacto punto del espacio y en este preciso instante en el tiempo, hay un electrón, desplazándose a tal velocidad". Pero nues-

tros mismos instrumentos forman parte del universo que queremos explorar, y comparten sus defectos, uno de los cuales, en propósitos exploradores, es su atomicidad. Porque la materia y la radiación son ambas atómicas y por esa causa no podemos obtener nunca instrumentos perfectamente precisos para nuestras investigaciones, únicamente nebulosos grupos de pruebas que no nos permiten dibujar cuadros precisos de ninguna cosa. La masa más pequeña que podemos manejar es la del electrón; la más pequeña suma de energía que podemos liberar es la de un *quantum* completo. El impacto de un electrón o de un *quantum* trastorna la parte del universo que estamos intentando explorar, y la remplaza por algo nuevo, lo cual, a su vez, de la misma manera evade el estudio preciso. Tales son las ideas contenidas en el principio de indeterminación que introdujo Heisenberg en 1927.

Heisenberg demostró que la bronca textura de la naturaleza hace imposible, en principio, fijar ni la posición ni la velocidad de un electrón con precisión perfecta; si reducimos la incertidumbre en una, automáticamente acrecentámosla en la otra, y el producto de las dos incertidumbres jamás puede reducirse por debajo de cierto valor mínimo. Este valor mínimo es un múltiplo sencillo de la constante *h* de Planck, lo que, ciertamente, es natural. Porque si esta constante especifica la atomicidad de la radiación, tenemos, asimismo que esperar que especifique lo indefinido de nuestro conocimiento, que dimana de esta atomicidad. De tal suerte, nuestras medidas de posición y velocidad deben tenerse como indicadoras de probabilidades más que de hechos ciertos.

En 1926 indicó Born que las ondulaciones matemáticas de De Broglie y Schrödinger pueden interpretarse como gráficas que representan las probabilidades de que los electrones se hallen en los varios puntos del espacio, cero ondas en un punto significa probabilidad cero; ondas débiles significan ligera pro-

babilidad, y así sucesivamente. Las ondas no existen en un espacio ordinario de tres dimensiones, sino en un espacio puramente imaginario multidimensional, y esto demuestra únicamente que hay construcciones meramente matemáticas que no tienen ninguna existencia material. A pesar de todo esto, su propagación, con arreglo a ecuaciones definidas, da cuenta perfecta de los acontecimientos que se verifican dentro del átomo o, por lo menos, de la radiación que sale del átomo. Del mismo modo, las ondas pueden interpretarse como representaciones diagramáticas de nuestro conocimiento acerca de los electrones que estudiamos, razón por la cual se denominan a veces *ondas de conocimiento*.

El estudio profundo de estos resultados puso en claro que la materia no podía interpretarse ni como ondas ni como partículas, ni incluso como ondas más partículas. La materia presenta algunas propiedades que son incompatibles con su estructura en ondas, y otras que son incompatibles con su estructura en partículas. En general, se aceptó que debe interpretarse como una cosa que en alguno de sus aspectos nos recuerda las partículas y en otros nos recuerda las ondas, pero con la cual no se puede construir ningún modelo o cuadro inteligible. Las ondas tienen que ser ondas de probabilidad u ondas de conocimiento (las dos interpretaciones son equivalentes), en tanto que las partículas son completamente materiales y nos sirven como tipo para sugerirnos nuestra idea sobre lo material. Mas el universo percibido por nuestros sentidos es materia y radiación. Si la materia fuera lo que acabamos de decir, ¿qué diríamos de la radiación?

Como ya hemos visto, había por estos días dos puntos de vista sobre la radiación aparentemente incompatibles. Uno de ellos la consideraba como ondas (las oscilaciones electromagnéticas de Maxwell) el otro la consideraba como partículas (las "flechas de luz" de Einstein, a las que ahora llamamos *fotones*).

Evidentemente, había en esto un dualismo exactamente igual al encontrado en la interpretación de la materia. Y la explicación se presentaba de igual manera: nunca podemos saber dónde está exactamente un fotón; todo es cuestión de probabilidades y, exactamente igual que las ondas de De Broglie y Schrödinger muestran las probabilidades de que los electrones están en uno u otro lugar, las ondas de la teoría electromagnética de Maxwell y de la teoría ondulatoria de la luz (ondas que usualmente denominamos *ondas luminosas)* pueden interpretarse como ondas que expresan la probabilidad correspondiente para los fotones.

Dirac. En 1930, P. A. M. Dirac, en la actualidad profesor de la Universidad de Cambridge, publicó un importante libro, titulado *Quantum Mechanics,* que tendía a presentar la teoría entera en sólida forma matemática y a unificar las varias teorías que ocupaban entonces el campo. Exponía una teoría matemática de tipo muy abstracto, la cual, como él probó, incluía, como casos especiales, la mecánica de matrices y la mecánica ondulatoria. Su concepción básica era que los procesos fundamentales de la naturaleza pueden describirse como acaeceres que se producen en el espacio y en el tiempo; al otro lado de cuanto podamos observar, hay un sustrato de acontecimientos que no se dejan representar. La observación de estos acontecimientos es una especie de proceso que éstos han de sufrir, y por el cual cambia su forma; esto los trae, por así decirlo, a la superficie del sustrato, donde es posible representarlos en espacio y tiempo, y así hacerlos sensibles a nuestros instrumentos y a nuestros sentidos.

Esto nos sitúa en la frontera del conocimiento actual de la teoría cuántica, y parece que aquí se ha detenido el progreso. Existen todavía unas cuantas dificultades no resueltas, de las cuales algunas pueden resultar fundamentales, e innumerables cuestiones de detalle sobre las cuales hace falta más conocimiento. Algunos físicos creen que las presentes dificultades po-

drán dominarse muy pronto mediante modificaciones secundarias de las teorías existentes. Otros, menos optimistas, piensan que algo completamente nuevo y fundamental que permanece aún sin descubrir, o alguna gran síntesis simplificadora que está por venir, lo pondrá todo en claro. Toda nueva explicación de la naturaleza, al principio, ha parecido extraña o irracional; propendemos a esperar un universo mecánico, conformado a nuestra experiencia de nuestro mundo de cada día, de magnitud humana, y cuanto más nos alejamos de este mundo de magnitud humana, más extraño nos parece el mundo en que nos encontramos. La teoría de los *quanta* no es una excepción.

Otros progresos de la física

Acabamos de mencionar la mayor parte de los últimos grandes descubrimientos logrados en la física del presente siglo; pero dejaría muy mala impresión que aquí diéramos fin a nuestro estudio. Porque en los años recientes se ha dedicado enorme suma de esfuerzo a desarrollar y extender la obra del siglo XIX, especialmente en el sentido de ensanchar los límites de las temperaturas y presiones utilizables en el laboratorio, y de estudiar las propiedades de la materia en las nuevas condiciones que ahora podemos nosotros crear.

Acaso el más poderoso empuje para ensanchar los límites se ha dado en lo referente a las bajas temperaturas. Dos dificultades hay en esto, por supuesto; la primera, poner la sustancia por estudiar a la baja temperatura requerida, y la segunda, mantenerla allí.

A principios del siglo XIX, Gay Lussac pensaba que había demostrado que cuando un gas se dilataba libremente y quedaba inactivo, no experimentaba ningún cambio de temperatura y, por consiguiente, ningún cambio de energía. Posteriormente,

Joule, lord Kelvin y otros hallaron que esto no era del todo verdad; un gas que atravesaba un tapón poroso para entrar en un vacío, se enfriaba ligeramente a causa del trabajo realizado en vencer las mutuas atracciones de las moléculas de dicho gas. En bajas temperaturas, el descenso de temperatura puede ser sustancial, y haciendo pasar un gas poco a poco a través de un tapón poroso, la temperatura puede descender continuamente. Basándose en este principio, James Dewar consiguió licuar el hidrógeno en 1898, a una temperatura de −252.7 °C. Después de éste se licuaron otros muchos gases en rápida sucesión, hasta que, por último, cuando Kamerlingh Onnes licuó el helio en 1908 a una temperatura de 4.22 °C sobre el cero absoluto, este último gas se hizo utilizable en estado líquido.

La segunda dificultad se venció con el "frasco de vacío" (termo) de James Dewar. Una capa de aire, como sabemos todos, es muy buen aislador del calor; nosotros usamos ropas para mantener una capa de aire junto a la piel. Cuanto menos denso es el aire, mejor aislador es respecto del calor, de suerte que un vacío perfecto es el no-conductor ideal. El frasco de vacío de Dewar se basa en este principio; consiste en un frasco de dos paredes separadas por un vacío; es el corriente "termo" del comercio que utilizamos para conservar caliente la sopa o el café; Dewar lo empleó para mantener líquido el aire u otras sustancias, y ha resultado del más útil servicio en el estudio de la materia a bajas temperaturas.

Kamerlingh Onnes no se detuvo cuando licuó el helio, sino que, en Leiden, con un grupo de cooperadores, procedió a trabajar con temperaturas aún más bajas, aproximándose pronto hasta menos de un grado del cero absoluto. Existen ahora medios magnéticos utilizables para llegar a una diminuta fracción de grado del cero absoluto.

El acceso a estas bajas temperaturas ha abierto un vasto nuevo campo (el estudio de la materia que está casi fuera de toda

perturbación que produjera el calor por movimiento de las moléculas). En este caso, muchas de las propiedades de la materia resultan ser completamente diferentes de las que conocemos en la vida ordinaria. Kapitza ha demostrado que las propiedades magnéticas de la mayor parte de las sustancias cambian de manera notable a bajas temperaturas. En el año de 1935, Keeson y Rollin hallaron que, a temperaturas inferiores a 2.19 °C del cero absoluto, el helio cambia su carácter tan completamente que se convierte en un gas casi diferente, el cual se denomina hoy *helio II*. Este gas no tiene casi ninguna viscosidad y es un asombroso buen conductor del calor. Pero quizás la propiedad más sorprendente de todas es la llamada *superconductividad*. Cuando un metal se enfría a cierta temperatura crítica que es característica del metal, se convierte en un casi perfecto conductor de la electricidad. A cualquier temperatura ordinaria, una corriente inducida en un circuito, si no se mantiene, desaparecerá en una fracción de segundo; pero a suficiente baja temperatura, la corriente puede continuar con su propio momento durante horas y aun días. Este último efecto se conoce hace años, mas no existe aún ninguna teoría satisfactoria que lo explique, e igual puede decirse de la mayor parte de los fenómenos a baja temperatura; éstos, más que aumentar el contenido de la ciencia, lo que hacen es plantear problemas, por lo que en una historia de la ciencia es suficiente una breve mención.

En el plano de las altas temperaturas hay menos que decir; se han llegado a obtener temperaturas próximas a 20 000 °C, pero no se ha encontrado el modo de hacer gran cosa con ellas. La naturaleza nos proporciona mucho más elevadas temperaturas en las estrellas, y hace experimentos con ellas a su manera, y acaso sea con la astrofísica con la que podamos conocer mejor las propiedades de la materia a altas temperaturas.

Poco más o menos puede decirse de las presiones extremas. Nos es posible ahora lograr presiones entre las categorías de

una cienmillonésima de atmósfera hasta 100 000 atmósferas, aproximadamente; pero aquí también podemos decir que en la astrofísica se encuentran límites más amplios, y puede que sirvan para que estudiemos en la Tierra los efectos de las presiones extremas.

Astronomía

Astrofísica

Astrofísica es el estudio de la constitución física de las estrellas. Nació como un retoño de la espectroscopia, cuando John Herschel sugirió, en 1823, que el estudio del espectro de una estrella podía descubrir la composición química de ella, y durante un siglo pareció que este estudio era el punto central de la nueva ciencia.

En 1867, el padre Secchi, del Observatorio del Vaticano, en Roma, dividió los espectros estelares en cuatro clases principales. Hoy es costumbre emplear una clasificación más detallada, ideada por el Observatorio de Harvard. Se ha llegado a encontrar que los varios tipos de espectros observados pueden ordenarse en una sucesión continua, emergiendo cada tipo gradualmente de su vecino inmediato. La razón de ello es que el espectro de una estrella depende enteramente de la temperatura de sus capas superficiales, y la serie continua es simplemente la que resulta del decrecimiento de la temperatura. Las estrellas de luz más azul vienen las primeras en serie, y las estrellas de luz roja las últimas, porque, cuanto mayor es el calor de una estrella, más azul es su color.

Los varios tipos de espectros presentan las líneas características de diferentes elementos químicos: uno de ellos acusa la presencia de helio en gran cantidad, el próximo, del hidrógeno,

y así sucesivamente. Se imaginó, al principio, un poco ingenuamente, que las estrellas estaban constituidas principalmente por estos elementos que se manifiestan con más intensidad en sus espectros. Cuando los tipos de espectro hicieron ver que formaban una sucesión lineal, se imaginó que esto podría representar las diferentes etapas de la evolución de una estrella, y se esbozaron descripciones de estrellas que, constituidas principalmente de hidrógeno, estaban en los comienzos de su existencia, y cambiaban gradualmente a elementos más pesados a medida que avanzaban en edad. Todo esto desapareció cuando Saha dio, en 1920 y 1921, la interpretación correcta de los espectros estelares, del modo siguiente: a diferentes temperaturas, los diferentes elementos químicos se muestran fuertemente. De esta suerte, a una temperatura, por ejemplo, de 10 000 °C, los átomos de algunas sustancias, pero no todas, estarán activamente dedicados a emitir radiaciones; si la temperatura desciende a la mitad, estas sustancias dejarán de emitir radiación, en tanto que otras ocuparán su puesto. Según la anterior interpretación de los espectros estelares, una estrella que repentinamente se enfriara pasando de 10 000 a 5 000 °C, parecería haber cambiado súbitamente el hidrógeno, el helio y el hierro que la constituyeran por calcio, carbono, etc. Sabemos ahora que todas las estrellas están constituidas en gran parte de la misma mezcla de elementos, pero que presentan diferentes espectros porque sus capas superficiales están a temperaturas diferentes. En este aspecto el espectro es útil como indicación de la temperatura. Pero éste no es, ni con mucho, para lo único que se le emplea; nos informa también del movimiento de una estrella en el espacio, del brillo intrínseco de una estrella, de su masa y de la composición de su atmósfera.

Estrellas gigantes y estrellas enanas. Como las estrellas se hallan tan distantes que ningún telescopio puede presentarlas sino como meros puntos de luz, es imposible determinar sus diáme-

tros por medida directa. Pero el espectro de una estrella nos dice cuál es su temperatura, de manera que sabemos cuánta radiación emite por metro cuadrado de su superficie; sabemos también cuál es el total de su emisión de radiaciones por la cantidad de luz que recibimos de ella. Una sencilla operación de dividir nos dice entonces el área total de su superficie, y de aquí deducimos su diámetro.

En 1913, el profesor Hertzsprung, de Leiden, calculó por este método algunos diámetros estelares, y halló que las estrellas más frías, las de color rojo oscuro, eran de dos clases distintas: estrellas de diámetro muy grande y estrellas de diámetro muy pequeño, a las que llamó gigantes y enanas. No había estrellas de magnitud intermedia. Poco después, el profesor H. N. Russell halló que esto también es cierto, aunque en menor grado, para todos los tipos de estrellas más frías. En las estrellas más calientes, persistía la separación entre estrellas grandes y pequeñas en amplitud considerable, y después desaparecía: las dos ramas de estrellas grandes y pequeñas se fundían en una sola.

Russell representó todo esto en un diagrama (el famoso *diagrama Russell*). Puso las estrellas más rojas al extremo de la mano derecha del diagrama y las más azules al extremo izquierdo y situó estrellas de otros colores en las posiciones apropiadas. Puso también las estrellas a diferentes alturas en el diagrama para representar su brillo diferente (y de esta suerte, por supuesto, sus magnitudes diferentes), situando la más brillante de todas en el tope superior, la más débil en la base del diagrama, con estrellas intermedias también en sus apropiadas posiciones intermedias. Cuando Russell hizo esto, halló que su diagrama tenía (poco más o menos) la forma de una V acostada, de esta manera: <. El brazo superior lo constituían, naturalmente, estrellas gigantes, y el inferior estrellas enanas; el abismo de Her-

tzsprung era el que quedaba entre los dos brazos al extremo de la derecha.

Russell dio a esto una interpretación evolutiva. Es decir, pensó que, a medida que envejecía una estrella, resbalaba desde el tope hasta el fondo de la <, cambiando primeramente desde el rojo al azul, y después volviendo del azul al rojo, a medida que su brillo intrínseco disminuía constantemente. En general, se suponía que una estrella comenzaba su vida como una inmensa masa relativamente fría de gas nebuloso. Pero el estadunidense J. Homer Lane había demostrado en 1870 que tal masa de gas, al perder energía por radiación, debía contraerse, con lo que, al mismo tiempo, aumentaría su temperatura. Suponía Russell que esta contracción y este aumento de calor convertirían una masa de gas nebuloso, primero, en una estrella roja gigante, de inmensa magnitud, que después pasaría por la sucesión de las estrellas gigantes, calentándose cada vez más y reduciendo su magnitud hasta que su densidad llegaba a ser parecida a la del agua. Entonces la masa se hallaba tan lejos del estado gaseoso que ya no se le podía aplicar la ley de Lane. Russell identificó esta etapa con el punto en que se junta el brazo de las gigantes con el de las enanas, en la < del diagrama, e imaginó que desde este momento la estrella se contraía y se enfriaba a la vez, pasando por la sucesión de las estrellas enanas hasta que, finalmente, se desvanecía en la oscuridad. Durante algún tiempo pareció que esta concepción describía de modo satisfactorio las variedades observadas en los espectros y diámetros estelares, al mismo tiempo que daba una razonable explicación de la evolución de las estrellas. Sin embargo, se hizo insostenible hacia el año 1917, cuando Arthur Eddington, profesor plumiano de la Universidad de Cambridge, demostró que el brillo de una estrella ordinaria dependía principalmente de su masa. De esta suerte, en tanto que la masa de una estrella permaneciera aproximadamente igual, la estrella no podía aparecer más brillante

o más apagada. Y no hay razón alguna para esperar que ocurra ningún cambio importante en la masa de una estrella durante los pocos millares de millones de años que forman la vida de una estrella de tipo medio, de suerte que el brillo de una estrella ordinaria debe permanecer estimablemente constante. A la luz de este conocimiento, logrado entonces, la teoría evolutiva de Russell se hizo insostenible.

Interiores estelares. Hasta entonces, la observación y la teoría se habían referido únicamente a las superficies de las estrellas; llegó el momento en que el interés pasara a sus mecanismos interiores, a los cuales sólo podía alcanzar la teoría. En 1894, R. A. Sampson, de Edimburgo, había indicado que en el interior de las estrellas el calor debía propagarse por radiación más que por conducción; pero su estudio de los interiores estelares no fue válido porque adoptó una ley de radiación equivocada. En 1906, el profesor Schwarzschild, de Cotinga, acometió el estudio del mismo problema y dio una fórmula exacta para la propagación de la energía. Desde 1917 en adelante, Eddington hizo un estudio profundo de los interiores estelares y consiguió aportar una explicación teórica de su ley que relaciona la masa de una estrella con su brillo. Obtuvo un resultado único que demostró ser de gran importancia: las temperaturas centrales de las estrellas enanas ordinarias son todas aproximadamente iguales (poco más o menos 20 000 000 °C) y dependen sólo ligeramente de la magnitud y de la masa de la estrella.

Esto hizo pensar en un nuevo esquema de evolución estelar. Podía suponerse que una estrella empieza como una masa de gas nebuloso y frío y que se contrae hasta que su temperatura en el centro alcanza los mencionados 20 000 000 °C. Entonces se habría convertido en estrella enana ordinaria, y de esta suerte conservaría su actual brillo y magnitud por largo tiempo. Verdaderamente, la etapa preliminar de contracción habría ocupado solamente unos pocos millones de años (p. 361), de

suerte que se disponía de millares de millones de años durante los cuales debía la estrella irradiar energía sin mucho cambio en magnitud o estado. Esto hacía pensar que en el interior de las estrellas debía de algún modo hallarse energía, desde el momento en que la temperatura llegara a 20 000 000 °C. La cuestión que se planteaba era el cómo se produciría esto.

Ya hemos mencionado la suposición no comprobada de que la evolución de una estrella debe ir acompañada de una transmutación de su sustancia de elementos ligeros a elementos pesados. Los experimentos de Rutherford y de otros habían mostrado que en tal suposición no hay nada intrínsecamente imposible. Como los pesos atómicos de la mayor parte de los elementos no son números enteros exactos, toda transmutación debe ir probablemente acompañada de una pequeña pérdida o ganancia de masa; si se pierde masa, la energía correspondiente será liberada en forma de radiación. Perrin y Eddington enunciaron la idea de que la transmutación del hidrógeno en elementos más pesados proporcionaría aproximadamente la suma de radiación necesaria para los millares de millones de años que aparecían entonces como vida normal de una estrella.

Origen de la energía de las estrellas. Todo esto parecía indicar que una estrella pudiera obtener la energía necesaria para su radiación de alguna transmutación de su sustancia; pero se tardó algún tiempo en descubrir el verdadero proceso. En 1938 y en 1939, Bethe, Gamow y Teller y otros propusieron un esquema basado en cálculos preliminares de R. d’E. Atkinson y Houtermans (1929), que entonces se pensó que proporcionaba la más probable descripción de lo que en realidad ocurre.

En resumen, supone este esquema que se combinan cuatro protones para formar un núcleo de helio con el auxilio de un núcleo de carbono que acelera el proceso con su presencia, pero éste no le afecta, por lo que no se altera (actúa, como dicen los químicos, catalíticamente). El núcleo de carbono (de peso

atómico 12) prende primero un protón y se combina con él para formar un núcleo de peso atómico 13, que es uno de los isótopos del nitrógeno. Entonces éste prende dos protones más, sucesivamente, y forma núcleos de nitrógeno de pesos atómicos 14 y 15. Aun es prendido un cuarto protón, pero la combinación no puede formar un núcleo de nitrógeno de peso atómico 16, porque tal estructura es inestable, y se rompe inmediatamente en dos núcleos de pesos 12 y 4. El primero es el núcleo del carbono original, el cual queda restaurado en la estrella sin lesión alguna. El segundo es un núcleo de helio que tiene una masa más pequeña que los cuatro protones obligados a reunirse para formarlo. La diferencia de masa, que es aproximadamente la de 0.028 de protón, se ha liberado como radiación. Aunque este esquema es complicado, en el sentido de que deben producirse muchas transmutaciones antes de llegar al producto final, no obstante se ha confirmado por la observación en laboratorio en cada una de las etapas. Sen y Burman (1945) habían calculado que esto da la exacta emisión de radiación para el Sol si se supone que éste tiene el 35 de su peso de hidrógeno, lo que está bastante de acuerdo con las estimaciones hechas anteriormente si la materia del centro del Sol es de una densidad 45 veces la del agua y tiene una temperatura de 20.2 millones de grados.

En general, hoy se supone que las estrellas enanas ordinarias se han formado de alguna manera parecida a ésta. Pero antes de llegar a su estado presente, la materia central de una estrella debe de haber pasado por todas las temperaturas hasta los 20 000 000 °C aproximadamente. Y existen otras reacciones nucleares (las de los protones y deuterones [p. 369] mutuamente entre ellos, y con los núcleos de los elementos ligeros, litio, berilio y boro), que se sabe tienen lugar a temperaturas muy inferiores a 20 000 000 °C. Como la materia de las estrellas enanas debe de haber pasado por todas las temperaturas en las cuales se operan estas transmutaciones, parecería en todo caso proba-

ble que las estrellas se detendrían durante algún tiempo en su evolución en estas más bajas temperaturas, alimentándose su radiación por el desgaste de estos elementos ligeros. Realmente, como señalaron Gamow y Teller, existen distintos grupos de estrellas que tienen casi exactamente las temperaturas centrales necesarias para que se verifiquen estas reacciones. El grupo de estrellas conocido como *gigantes rojas* (p. 392) tiene la exacta temperatura central para la reacción de los deuterones con otros deuterones y con protones. Otro grupo, el de las estrellas conocidas como *variables cefeidas* (p. 401), está definido menos claramente; pero Gamow y Teller piensan que está formado por la superposición de tres grupos separados, con temperaturas centrales suficientes para las reacciones de los protones con núcleos, respectivamente, de litio, berilio y boro de peso atómico II. Viene, finalmente, un grupo de estrellas variables conocido como *cúmulos variables* con temperaturas centrales apropiadas para la reacción de protones con el boro de peso atómico 10.

Por consiguiente, parece que podemos permitirnos describir una estrella pasando por las sucesivas etapas en las cuales los deuterones y los núcleos de los elementos ligeros, litio, berilio y boro se transmutan todos uno tras otro hasta que se agota la provisión de esos elementos. Pasado esto, la estrella se contraerá hasta que su centro alcance la temperatura en la cual actúen mutuamente los protones con los núcleos de carbono. En las primeras de estas acciones mutuas los elementos ligeros habían sido inutilizados, en tanto que, por lo menos, el hidrógeno sobrevivía. A continuación, el mismo hidrógeno se destruye, pero el carbono sobrevive, y con el tiempo se llega a una etapa en la cual ya no hay bastante hidrógeno para mantener la radiación de la estrella.

Cuando llega esta etapa, la estrella de nuevo debe contraerse y su temperatura central comienza a elevarse. Posiblemente ha-

ya otras reacciones que proporcionen más energía para la radiación; pero, en todo caso, parece que la estrella termine probablemente en lo que se llama una *enana blanca*. En estas estrellas la materia está sumamente comprimida, de manera que su densidad es varios millares de veces la del agua; sus diámetros son pequeños (a veces no mayores que la Tierra) y, a pesar de que emiten muy poca radiación, las temperaturas de su superficie son altas, elevándose hasta cerca de 70 000 °C en las estrellas centrales de las nebulosas planetarias. Estas estrellas emiten e tan poca radiación que, incluso, la energía liberada por su contracción por efecto de la gravedad es suficiente para proveerlas de radiación durante larga vida. Al final deben perder gradualmente todas sus reservas de energía y se sumen en la oscuridad.

Astronomía observacional

Durante el siglo XIX, la astronomía observacional, al igual que la física, había hecho ininterrumpidos progresos siguiendo líneas bien establecidas; en el nuevo siglo, lo mismo que en la física, las nuevas ideas y los nuevos métodos aceleraron enormemente el progreso. Lo primero y ante todo: el siglo XX es la era de los telescopios gigantes; o así nos parece al menos. Se ha dicho que la historia de la astronomía es la historia de horizontes que se alejan, y en las décadas que dieron comienzo de nuestro siglo, gracias, en gran parte, al rápidamente creciente tamaño y potencia de los telescopios, el horizonte se alejó a paso desconcertante. Cuando terminó el siglo XIX, el conocimiento astronómico estaba casi enteramente confinado al sistema solar. Los observatorios concedían su atención principalmente a los movimientos del Sol, la Luna y los planetas, y a los aspectos de estos últimos, en tanto que fuera de los observatorios, los conferenciantes populares intentaban helarnos la sangre al decirnos

cuánto tiempo invertirían los trenes expresos en pasar de un punto a otro del sistema solar. Poco se conocía referente a las estrellas, excepto las distancias de unas cuantas de las más próximas, e incluso no había gran seguridad acerca de ellas.

Gradualmente, el interés central saltó de los planetas a las estrellas, y más adelante, al menos para muchos astrónomos, de las estrellas a las nebulosas. Cada uno de estos escalones representaba multiplicar por un millón la penetración en las profundidades del espacio, porque las estrellas más próximas están casi un millón de veces más distantes que los planetas más próximos, en tanto que las nebulosas más cercanas están a un millón de veces más distantes que las estrellas más próximas.

Distancias estelares. En los telescopios, además del sencillo acrecentamiento de su poder de captación de luz, mediante el aumento de su tamaño, se mejoró con perfeccionamientos técnicos que quizá tuvieran un papel aún más importante. Entre éstos fue uno de los más valiosos la aplicación de la fotografía a la astronomía. Su valor quedó demostrado en la determinación de las distancias estelares, primero por Schlesinger en Alleghany, en 1902, después por A. R. Hinks y H. N. Russell en Cambridge, en 1905, y poco después en la mayor parte de los observatorios del mundo. Antes de introducir el empleo de la fotografía se hallaba la distancia de una estrella midiendo, en primer lugar, las distancias angulares que la separaban de un número de las más débiles y, por tanto, presumiblemente muy distantes, y después registrando los cambios de estas distancias a medida que la Tierra se movía en su órbita alrededor del Sol. Si una estrella no aparecía con movimiento relativo respecto del Sol, el ángulo que hubiera descrito sobre el fondo representado por las débiles y remotas estrellas daría la medida de su distancia (por supuesto, en términos del diámetro de la órbita de la Tierra). La mayor parte de las estrellas están en movimiento en relación con el Sol, pero ese movimiento relativo se

registra con facilidad y se descuenta de una manera que se explicará después. La fotografía remplaza la pesada e incierta medida de los ángulos en el firmamento, por la simple medida de las distancias en una placa fotográfica; únicamente era necesario tomar fotografías de la misma pequeña región del firmamento a convenientes intervalos de tiempo, y asunto terminado. Por este método se habían medido las distancias de millares de estrellas; pero resulta ineficaz para estrellas muy distantes, porque su movimiento aparente en el firmamento es demasiado pequeño para que admita medida; para estas estrellas había que buscar otros métodos. Además, las distancias exactas de unos pocos centenares de estrellas proporcionan una especie de vara de medir, con base en la cual pueden medirse por otros medios distancias mayores, y pronto hemos de ver de qué manera tiene ahora el astrónomo a su disposición una selección de varas de medir de diferentes géneros y longitudes, con las cuales se pueden medir distancias comprendidas entre $4^1/_2$ años luz, distancia de las estrellas más próximas, y aproximadamente 500 millones de años luz, que es la distancia de los objetos más lejanos que podemos ver en el espacio.

Hemos visto de qué manera Newton intentó estimar las distancias estelares resolviendo que las estrellas eran *faros tipo,* teniendo cada uno de ellos el mismo brillo intrínseco (o *luminosidad*) que el Sol. Tal hipótesis no se admite hoy, porque sabemos que las luminosidades de las estrellas están comprendidas entre menos de una trescientos milésima de la del Sol y 300 000 veces la de éste. Mas pueden todavía emplearse como faros tipo ciertas clases de cuerpos celestes iguales en luminosidad y de magnitud conocida, de suerte que la distancia de tal cuerpo celeste puede deducirse de su débil apariencia.

La mayor parte de estos cuerpos son ciertos tipos de estrellas variables (estrellas que no brillan con luz constante, sino que fluctúan en brillantez). Las más interesantes y útiles de todas

son las conocidas como variables cefeidas, llamadas así por su prototipo, la estrella δ de Cefeo. Éstas fluctúan con periodos definidos perfectamente regulares, y de manera muy perceptible (un rápido aumento del brillo va seguido de una disminución mucho más lenta) y, por tanto, se reconocen con facilidad.

En 1912, Miss Leavitt, de Harvard, hizo un estudio de las variables cefeidas en la Nube Menor de Magallanes, vasto grupo de estrellas situado fuera de los confines del sistema galáctico, y halló que todas las que tenían el mismo periodo de fluctuación de su luz se veían igualmente brillantes. La brillantez de una estrella depende a la vez de su distancia y de su luminosidad intrínseca; pero en este caso todas las estrellas de la Nube estaban aproximadamente a la misma distancia. Evidentemente, el resultado hallado por Miss Leavitt sólo podía significar que todas las estrellas del mismo periodo eran también del mismo brillo intrínseco; en otras palabras: las cefeidas de cualquier sencillo periodo que se les asignara podían utilizarse como *faros base*. Como ya se han medido las distancias de un cierto número de cefeidas de la manera antes explicada, ha sido posible deducir el brillo intrínseco de cefeidas de cualquier periodo y de aquí deducir la distancia de cualquier objeto en el cual puedan reconocerse cefeidas. Estas estrellas han proporcionado uno de los más útiles patrones para inspeccionar las profundidades del espacio.

Movimientos estelares. Pronto se demostró que la fotografía era igualmente útil para el estudio de los movimientos de las estrellas en el espacio. Si dos placas se impresionan a intervalos exactamente anuales, se elimina el efecto perturbador del movimiento de la revolución de la Tierra alrededor del Sol, y todos los movimientos de las estrellas respecto del panorama del firmamento deben representar movimientos reales respecto del Sol. Los mejores resultados se obtienen, naturalmente, midiendo el movimiento durante un largo intervalo de años, resultan-

do especialmente útiles las observaciones de estrellas que hizo Bradley en 1755.

Este método sólo nos informará, por supuesto, sobre el movimiento de una estrella en direcciones que van alrededor del Sol; no puede descubrirnos movimientos dirigidos hacia el Sol, ni movimientos dirigidos opuestamente a él. No más cerca que en el año 1868, sir W. Huggins había manifestado que sería posible determinar estos movimientos mediante el estudio del espectro de una estrella; todo movimiento a lo largo de la línea de visión debía producir cierto corrimiento de las líneas del espectro, y podía deducirse la velocidad del movimiento de la estrella de la importancia de este corrimiento. En los primeros años de este siglo, W. W. Campbell, director del Observatorio de Lick, utilizó este método muy eficazmente, y pronto se supo con gran aproximación cuáles eran las velocidades radiales de gran número de estrellas.

Por este tiempo se imaginaba generalmente que las estrellas marchaban puramente al azar de sus movimientos, y el interés principal del problema de los movimientos estelares fue determinar el movimiento del Sol en su marcha por el espacio. Sin embargo, cuando Kapteyn, de Goninga, examinó estadísticamente los movimientos estelares, descubrió que no se trataba de movimientos puramente al azar, sino que presentaban señales de adaptarse, si bien algo imperfectamente, a un plan definido. En 1905 anunció que las estrellas situadas en las proximidades del Sol podían clasificarse en dos grupos de distintas corrientes que se desplazaban una contra otra en sentidos opuestos. Pocos años después, Schwarzschild, Eddington y otros demostraron matemáticamente que los movimientos observados podían interpretarse de manera diferente a la de estas dos corrientes de estrellas. En los años últimos, Oort, Lindblad, Plaskett y otros han hecho más estudios estadísticos de los movimientos, y han descubierto una nueva singular regularidad. A

menudo se ha dicho que sólo el movimiento de las estrellas las salva de caer y juntarse todas ellas bajo su gravitación mutua en el centro del sistema; en 1913, Henri Poincaré calculó que bastaría para librarlas de tal destino una rotación cuyo periodo fuera alrededor de 500 millones de años. En este mismo año, Charlier anunció que el plano en que los planetas describen sus órbitas alrededor del Sol parecía estar girando lentamente en el espacio o, por lo menos, contra el fondo que forma la Vía Láctea, con un periodo de 370 millones de años. Ahora bien, la teoría dinámica requiere que este plano conserve continuamente la misma dirección en el espacio; por esta razón se le conoce como el *plano invariable*. Eddington sugirió en seguida la idea de que no era este plano el que estaba moviéndose, sino el sistema de estrellas de la Vía Láctea. Resulta entonces evidente que esta rotación es una realidad, aunque no es una rotación tan sencilla como la de una rueda de un coche. Se asemeja más bien al movimiento de los planetas alrededor del Sol, en el que ocurre que los planetas realizan su revolución en tiempos y velocidades diferentes, porque están a diferentes distancias del Sol. Como la investigación total es de naturaleza estadística, sus resultados no se aplican a las estrellas individuales, sino únicamente a los movimientos medios de pequeños grupos de estrellas que en el momento actual marchan muy próximas por el espacio. Se ha encontrado que el pequeño grupo de estrellas que rodea al Sol está describiendo una órbita cuyo periodo es de 250 millones de años aproximadamente, alrededor de un centro cuya dirección puede determinarse con aceptable exactitud, si bien su distancia presenta algunas dificultades.

La estructura del sistema galáctico. Cualquiera que fuere la distancia a que se halle, es evidentemente inconsistente la conclusión de sir William Herschel (p. 280) de que el Sol está en el centro del sistema galáctico, o cerca de él, conclusión que había sido muy aceptada en el siglo actual, e incluso confirmada en

1905 por los estudios estadísticos de Kapteyn acerca de la distribución de las estrellas en el espacio. En resumen, parecía que la distribución de las estrellas sugería que estábamos muy cerca del centro del sistema galáctico, mientras que los movimientos de las estrellas indican que estamos muy lejos.

Este rompecabezas se resolvió hacia el año de 1920 por el descubrimiento de que el espacio interestelar no es perfectamente transparente, sino que contiene materias que lo oscurecen, impidiendo el libre paso de la luz y, por tanto, limitan la penetración de nuestra visión; vivimos en una especie de niebla cósmica. Cuando paseamos por un bosque en un día de niebla, vemos únicamente los árboles que están alrededor de nosotros hasta cierta distancia, de suerte que nos hallamos en el centro de todos los árboles que vemos. No debemos, sin embargo, decir que estamos en el centro del bosque; estamos únicamente en el centro de nuestra esfera de visibilidad. Herschel y Kapteyn, viendo que estamos en el centro de todas las estrellas que podemos ver, cayeron en el error de pensar que nuestro lugar está en el centro del sistema total de estrellas.

Las estimaciones varían con arreglo al poder amortiguador de dicha niebla cósmica; pero todo el mundo está conforme en que la niebla es bastante densa para impedirnos ver las estrellas más distantes del sistema galáctico; más de la mitad de las estrellas de este sistema están ocultas a nuestra mirada. No obstante, otros objetos conocidos con el nombre de *cúmulos globulares* (grupos densos de millones de estrellas) tienen brillo suficiente para penetrar a través de grandes profundidades de esta niebla. Como estos cúmulos abundan en variables cefeidas (p. 401), es fácil medir sus distancias. En 1918, H. Shapley, director del Observatorio de Harvard, halló que aproximadamente ocupan estos cúmulos el interior de un espacio en forma de disco, situado en el plano de la galaxia, o muy cerca de éste. Se sabe ahora que el círculo de la galaxia tiene aproximadamente un

radio de 100 000 años luz, y que su centro no está en el Sol, ni cerca de él, sino que está situado a cerca de 40 000 años luz de distancia del Sol, precisamente en la dirección misma en que está el centro alrededor del cual describe el Sol su órbita de revolución. Todo lo que sabemos está de acuerdo en que los dos centros son idénticos y, por consiguiente, que el Sol (o, mejor dicho, el grupo de estrellas de que el Sol forma parte) hemos de suponer que gravita girando alrededor de este centro a una distancia cercana a los 40 000 años luz antes citados, tardando 250 millones de años en completar una revolución, y moviéndose, por tanto, a una velocidad próxima a 270 kilómetros por segundo.

El conocimiento de esta niebla cósmica ha puesto en claro otra dificultad que preocupó a los astrónomos en los primeros años de este siglo. Los objetos astronómicos podían dividirse en dos clases distintas según su apariencia general, y entonces se descubrió que estas clases podían, a su vez, dividirse en dos grupos, uno de los cuales parecía "esquivar" y el otro "preferir" el plano galáctico. La última de estas clases de objetos se veía únicamente en regiones del firmamento situadas cerca del plano galáctico, y la primera clase sólo en regiones muy alejadas de éste. Ahora sabemos que no hay esquivez ni preferencia en ningún sentido físico. Mas, como la niebla cósmica es particularmente densa y especialmente extensa en este plano, algunos objetos de luminosidad débil no pueden verse si están en ese plano, y de esta suerte parecen esquivarlo, no porque allí no haya ninguno, sino porque los que se encuentran allí no pueden verse a través de la densa niebla. Otras clases de objetos, como, por ejemplo, las próximas estrellas brillantes, difícilmente las perturba la niebla, y parecen preferir el plano galáctico debido a que, igual que la mayor parte de los tipos de objetos, existen allí en mayor abundancia que en otra región cualquiera.

Las nebulosas extragalácticas. Destacadas, entre los objetos que parecen evadir el plano galáctico, son las *nebulosas extragalácticas,* objetos de aspecto nebuloso que Kant y Herschel pensaron que podrían ser sistemas de estrellas análogos a nuestro propio sistema galáctico (p. 403). Se sabe en la actualidad que están situadas enteramente fuera de la galaxia y ninguna de ellas puede verse, a través de la niebla, próxima al plano galáctico, porque su luminosidad es demasiado débil para penetrarlo. Las que son visibles en otras regiones del firmamento aparecen tan débiles, que se necesitan los telescopios más grandes fabricados para poderlas examinar.

En el año 1924, E. Hubble, operando con el gran telescopio de 100 pulgadas (2.54 metros) del Observatorio del Monte Wilson, halló que las regiones exteriores de la más notable de estas nebulosas, la Gran Nebulosa de Andrómeda, podían resolverse en innumerables estrellas débiles; fue un descubrimiento análogo al que Galileo hiciera cuando apuntó por vez primera su telescopio a la Vía Láctea. Muy recientemente (1944), Baade ha encontrado que lo mismo ocurre en las regiones interiores de esta nebulosa. Se ha aplicado el mismo procedimiento a gran número de otras nebulosas, y se encuentra que todas ellas son sistemas de estrellas más o menos parecidos al nuestro.

La mayoría de las nebulosas se puede ordenar en una continua sucesión lineal, siguiendo la cual su magnitud y su forma cambian de manera continua. Se observa que todas las nebulosas que tienen la misma forma, tienen igual magnitud y, asimismo, igual brillo intrínseco, de suerte que aquí tenemos otra vez tipos de objetos-base, que en este caso son las nebulosas mismas. Las diferencias aparentes en magnitud y en brillo deben ocasionarlas las diferencias de distancia y, de tal suerte, podemos medir las distancias relativas de las nebulosas. Hubble había identificado algunas estrellas, en las nebulosas, como variables cefeidas (p. 401), y mediante ellas pudo medir las distancias

absolutas de muchas nebulosas y, de esa manera, obtuvo un patrón de medida para las distancias nebulares.

Éste y sus colegas habían estudiado la distribución general de las nebulosas en el espacio y hallaron que estaban espaciadas uniformemente y apartadas unas de otras a distancias cuya medida es aproximadamente de dos millones de años luz. Las más próximas están a distancias de 700 000 años luz, poco más o menos, en tanto que las más lejanas visibles están quizás a unos 1 000 millones de años luz de distancia. No existe ningún enrarecimiento en esas grandes distancias, tal como lo halló Herschel en nuestro propio sistema de estrellas, sino que existe un promedio de uniformidad hasta los límites que puede alcanzar el telescopio.

Acá y allá, sin embargo, los cúmulos globulares se hallan en grupos claramente definidos. Tales cúmulos sólo pueden mantenerse así mediante las atracciones gravitatorias de sus miembros. Como la velocidad del movimiento de los miembros de un cúmulo se puede determinar espectroscópicamente, es fácil valorar la atracción gravitacional, y de aquí, el peso de la nebulosa. Tales estimaciones de masas nebulares las han hecho Sinclair Smith y otros. El promedio de la masa de una nebulosa corrientemente cae en la cifra de 100 000 a 200 000 millones de soles, demostrando nuevamente que las nebulosas son sistemas de estrellas como el nuestro.

La expansión del universo. La distribución de las nebulosas en el espacio no es fácil que plantee ningún nuevo problema fundamental, excepto que nos agradaría saber hasta dónde se extiende más allá del alcance de nuestros telescopios; pero la cuestión es diferente respecto de los movimientos de las nebulosas. En este caso se hace cargo de la situación la teoría de la relatividad.

Hemos visto que la teoría de Einstein da una explicación perfecta del movimiento de los planetas en sus revoluciones al-

rededor del Sol. El estudio del universo como un todo plantea mucho más difíciles problemas. Hemos supuesto que todo espacio contiene materia, y que en cualquier zona queda determinada la curvatura del espacio por la cantidad de materia que contenga. Una pequeña porción de materia añade un poquito de curvatura al espacio, y si la materia está en todas partes en la cantidad justa, su efecto en total puede ser encerrar el espacio en un volumen finito que estará entonces en equilibrio. Para cualquier determinada densidad de materia habrá solamente una magnitud de espacio compatible con el equilibrio.

Al principio había supuesto Einstein que por este medio podía determinarse la magnitud del espacio. El promedio de densidad de materia en el espacio podía estimarse por las masas conocidas y las distancias medias de las nebulosas, de suerte que sería posible calcular cuál sería la magnitud. Los cálculos efectuados no importan gran cosa, porque se ha prescindido de ellos; pero estos y otros cálculos más recientes invitan a pensar que el número de nebulosas existentes en el espacio debe de ser parecido al número de estrellas contenidas en una sola nebulosa, el cual es del orden de 150 000 millones. Solamente unos 10 millones de ellas son visibles en los más grandes telescopios.

Esta descripción relativista de un espacio que se mantuviera en equilibrio por la presión de la materia que contiene (como un globo de goma se mantiene en equilibrio por presión del gas interior) pareció bastante satisfactoria hasta que el ruso Friedmann, en 1922, y el belga Lemaître, en 1929, demostraron que tal disposición no podía ser permanente. Hacía del espacio una especie de resorte arrollado con la curvatura de la materia que contenía, más que con la curvatura que puede recibir un resorte que sostiene un objeto pesado. Si la materia se moviera de un lugar a otro, la curvatura cambiaría en ambas zonas, y el universo ya no estaría en equilibrio. Las nuevas fuerzas puestas así en juego podían, o bien tender a restaurar el equilibrio original

o a aumentar el desequilibrio; su espacio, abandonado a sí mismo, comenzaría a extenderse o a contraerse.

Mientras que todo esto se discutía, Hubble y Humason, en Monte Wilson, obtuvieron unos resultados que, si se interpretaban del modo más claro, parecían demostrar que el espacio estaba en realidad ensanchándose y no en manera insignificante. Los espectros de las nebulosas presentaban corrimientos, los cuales, interpretados a su vez del modo más obvio, hacían pensar en que las nebulosas están, unas alejándose del Sol, otras acercándose a él. Algo de este movimiento provendría, naturalmente, del movimiento del Sol a razón de 270 kilómetros por segundo en su revolución alrededor del centro de la galaxia. Hubble y Humason hallaron que, después de admitir esto, los corrimientos restantes indicaban que todas las nebulosas se alejaban de nosotros a velocidades proporcionales a las distancias a que de nosotros se encuentran. El mayor corrimiento observado correspondía a una velocidad de 26 000 millas (41 843 kilómetros) por segundo, aproximadamente un séptimo de la velocidad de la luz.

Si a este resultado se aplicara la interpretación más obvia, el espacio ya no podía ser comparado con la superficie de un globo de goma en equilibrio, sino a la superficie de un globo que se estaba inflando. Las nebulosas podían compararse con pequeños botones incrustados en la goma, dando a entender estos corrimientos del espectro una expansión uniforme de las distancias entre nuestro botón y los otros. Superpuesta a esta expansión sistemática había otros más pequeños movimientos individuales de las nebulosas que no se adaptan a ningún plan perceptible.

Si se sigue a través del tiempo este movimiento de expansión, hallamos que el universo entero debió de estar limitado dentro de un volumen de espacio muy reducido en un periodo de hace unos cuantos miles de millones de años, periodo que es

exactamente comparable con la edad de la Tierra, según lo indican sus rocas radiactivas. Esto llevó a Lemaître a suponer que la materia del universo pudiera estar formada por los restos resultantes de la explosión de una única inmensa supermolécula. Mas, sin necesidad de adoptar una interpretación tan realista, podemos advertir que los movimientos aparentes de las nebulosas ponen a nuestra disposición una unidad de tiempo que es del orden de la edad de la Tierra y también probablemente de la edad de las estrellas.

Henos aquí muy cerca de las fronteras del conocimiento actual. Se han hecho exploraciones en el territorio más lejano y aún no conquistado, pero hasta ahora sin resultados tangibles ni satisfactorios. Por el momento, la concepción del universo en expansión ha planteado más cuestiones que las que haya podido resolver.

Evidentemente, esto es importante; la astronomía nebular, la física de lo infinitamente grande, nos cuenta, según hemos visto, la misma historia que la radiactividad, física de lo infinitamente pequeño, y la física forma, según se ha confirmado, un todo consistente.

Sir Arthur Eddington dedicó los últimos años de su vida al intento de establecer una síntesis aún más amplia que enlazara los hechos fundamentales de las diferentes ciencias y demostró que todos ellos eran necesarias consecuencias de ciertas hipótesis básicas, las cuales parecen haber sido los principios fundamentales de la teoría de los *quanta* sumamente camuflados.

Sobre esta base declaró haber demostrado que las velocidades de alejamiento de las nebulosas deben necesariamente ajustarse a las observaciones realizadas; que si nos representamos el universo como una estructura en el espacio y en el tiempo, el número de las dimensiones del espacio tiene que ser tres necesariamente y una para el tiempo; que si describimos el universo

como formado de partículas, unas estarán cargadas negativamente y otras positivamente; que la relación entre las masas de los dos géneros de partículas será la relación entre las raíces de la ecuación de segundo grado $10x^2 - 136x + 1 = 0$, o bien 1847.6, un número tal que, se obtenga exacta o inexactamente, está muy próximo a la relación observada entre las masas del protón y del electrón; que el número total de partículas que hay en el universo es necesariamente:

$$3/4 \times 2^{256} \times (1 + 2^3 + 2^7),$$

y que éste es un simple determinado múltiplo del cuadrado de la relación entre las atracciones eléctricas y gravitatorias de un electrón y un protón.

Pocos, si hubo alguno, de los colegas de Eddington, aceptaron enteramente sus puntos de vista; y también muy pocos, si hubo alguno, declararon entenderlos. Mas su equipo de ideas no parece irrazonable por sí mismo, y parece muy probable que en el transcurso del tiempo una vasta síntesis análoga pueda explicar la naturaleza del mundo en que vivimos, aunque el momento aún no se haya presentado.

[1] Parece que el bronce se usó primeramente en Creta hacia el año 3800 a. C., y en Egipto en la quinta dinastía (hacia el año 2800 a. C., o antes posiblemente; todos los datos de aquel oscuro y distante periodo son casi meras conjeturas).

[2] *Cambridge Ancient History,* t. I, caps. X-XII.

[3] En sus *Problemas* pregunta: "¿Por qué todos los hombres, sean bárbaros o griegos, cuentan a base de diez y no de cualquier otro número? Esto no puede ser casualidad, porque lo que es siempre y universalmente hecho no se debe a casualidad [...] Es porque los hombres nacieron con diez dedos, y por eso toman ese número para contar igualmente todas las demás cosas".

[4] En lugar de nuestras 10 cifras llamadas arábigas (véase p. 132), 0, 1, 2, 3,..., 9, los babilonios usaron sólo dos símbolos: el signo en forma de cuña, 𒁹 para denotar la unidad y 𒌋 para indicar el número 10; podemos casi imaginar que éstos han representado un dedo y dos manos estrechándose. Por ejemplo, escribían 𒌋𒁹𒁹𒁹𒁹 por nuestro número 14.

[5] Sir T. L. Heath, *Greek Astronomy,* p. LIII.

[6] *Mathematical Cuneiform Texts,* Neugebauer y Sachs (New Haven, 1945). Véase también Sir T. L. Heath, *Manual of Greek Mathematics,* p. 96.

[7] Las unidades y las decenas estaban representadas por | y ∩ en vez del babilónico 𒌋, mientras que hay otros símbolos para las centenas, los millares y así sucesivamente hasta los millones.

[8] El matemático verá la razón de esto si observa que los números pares e impares de la primera columna corresponden a los dígitos 1 y 0 cuando el multiplicando se expresa en el sistema de base 2.

[9] Publicado por primera vez en 1930.

[10] Sir T. L. Heath, *Greek Astronomy,* p. 113.

[11] *Science in Antiquity,* p. 36.

[12] En el *Fedro* de Platón, Sócrates dice que él había oído que el dios egipcio Thoth fue el primero que inventó la aritmética, ciencia del cálculo, la geometría y la astronomía.

[13] Véase Gilbert Murray, *Five Stages of Greek Religion.*

[1] Sir T. L. Heath, *Manual of Greek Mathematics,* p. 81.

[2] Por Diógenes Laercio, citando a Jerónimo de Rodas.

[3] Recientes investigaciones arrojan alguna duda sobre esta narración; pero yo la transcribo tal como lo dijo Herodoto y se ha repetido de otros innumerables historiadores. Si la cosa es verdad, el eclipse sería probablemente el del 28 de mayo de 585 a. C., aunque Eudemo, en su *Historia de la astronomía,* dice que fue alrededor de la quincuagésima Olimpiada, 580-577 a. C.

[4] No se sabe quién hizo este resumen. Al principio se conoció como resumen de Eudemo, probablemente por una creencia equivocada de que había sido escrito por Eudemo, discípulo de Aristóteles, y que era un extracto de su gran *Historia de la geometría.* Véase sir T. L. Heath, *A History of Greek Mathematics,* I, 118.

[5] Es un triángulo isósceles el que tiene dos lados iguales; en la figura II.1., los lados marcados con *X* son iguales, de suerte que los ángulos marcados con *o* son *semejantes*. El empleo de la palabra *semejante,* en vez de *igual,* sugiere que Tales no consideraba un ángulo como una magnitud, sino como una figura formada por líneas.

[6] Así, en la figura II.2., los ángulos señalados *x* son semejantes, como también los marcados *o*.

[7] *Opiniones sobre física.*

[8] *Refutatio omnium hæresium.*

[9] *De vita pythagorica.*

[10] Lecky, *History of European Morals,* II, 166; *Cambridge Ancient History,* IV, 576.

[11] De este modo el *n*-ésimo número triangular era la suma de la serie 1 + 2 + 3… de *n* términos, la cual es $\frac{1}{2}n(n + 1)$.

[12] Ésta es la equivalencia geométrica de la relación: $\frac{1}{2}(n - 1)n + \frac{1}{2}n(n + 1) = n^2$.

[13] Porque podemos representar cualquier cuadrado de un número n^2 por $n \times n$ puntos dispuestos en un cuadrado, y entonces puede añadirse una franja de $2n + 1$ puntos, n en fila sobre cada uno de dos lados adyacentes y uno en el vértice, obteniendo así el cuadrado $(n + 1)^2$. Si ocurre entonces que $2n + 1$ es un cuadrado perfecto, a^2, tendremos:
$a^2 + n^2 = (n + 1)^2$,
de suerte que a, n y $n + 1$ forman los lados posibles de un triángulo pitagórico, fórmula que es atribuida al mismo Pitágoras. El valor mínimo de $2n + 1$ cuadrado perfecto es 9, y esto lleva al triángulo de lados 3, 4 y 5.

[14] T. Eric Peet, *The Rhind Mathematical Papyrus,* p. 32.

[15] Porque si pudiera existir, supongamos que sean p y q los números más pequeños de que pudiera formarse. Entonces $q^2 = 2p^2$. Puesto que $2p^2$ es un número par, q^2 tiene que ser un número par, de suerte que q mismo tiene que ser también número par; sustituyámoslo por $2r$. Escribiendo este valor en lugar de q, la igualdad original se convierte en $p^2 = 2r^2$, la cual es la misma forma que la igualdad original, pero está formada por números más pequeños. Por tanto, la hipótesis original de que p y q eran los números más pequeños nos ha llevado a una contradicción. Se deduce, pues, que la relación $q^2 = 2p^2$ no puede ser cierta para ninguna clase de números.

[16] Uno de los últimos pitagóricos, Teodoro de Cirene, profesor de Platón en matemáticas, se dice que probó que las raíces cuadradas de 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 17 son también inconmensurables.

[17] Farrington, *Greek Science,* p. 23.

[18] Pero algunas narraciones dicen que Demócrito vivió hasta la edad de 90, 100, 104, 108 o 109 años.

[19] *Fedón.*

[20] Véase F. M. Comford, "Ensayo sobre filosofía natural griega y ciencia moderna", en *The Background to Modern Science,* p. 11.

[21] Sir T. L. Heath, *Greek Astronomy,* p. XLVII.

[22] Lucrecio, *De rerum Natura,* I, 63.
"Cuando la vida del Hombre sobre la Tierra en cobarde temor,
oprimido bajo el peso de la Religión, se tiende a reposar,
cuya faz, a todas las regiones del firmamento
lanza miradas furiosas de odio por la mortalidad,
un griego, el primero que contra ella osó alzar
sus ojos, contra su opresión de todos los días…
Hasta que hallándola bajo sus pies, la religión se amansa
y, por su victoria, el Hombre asciende hasta Dios."

[23] Si esto fue así, lo fue por pura coincidencia, porque no hay una clara relación entre los pesos de los martillos y las notas que éstos producen sobre un yunque.

[24] Hipólito, *Refutatio omnium hæresium.*

[25] Κυκλικῆς Θεωρίας Μετειόρων

[26] Pero dice Cleomedes que duda de los hechos alegados, sospechando que eran meras invenciones de "personas que deseaban causar perplejidad a los astrónomos y a los filósofos". En todo caso, dice, si tales eclipses ocurrieran, pueden explicarse adecuadamente por refracción en la atmósfera de la Tierra; hace posible esto el ver a ambos, el Sol y la Luna, cuando realmente están bajo el horizonte. "Pudiera posiblemente suceder, en un estado de completa humedad del aire que el rayo visual, al curvarse, tomara la dirección hacia debajo del horizonte y

captara al Sol después de su puesta, recibiendo de esta suerte la impresión de que el Sol está sobre el horizonte.”

[27] *Phaenomena.*

[28] Traducción de sir T. L. Heath, *Greek Astronomy,* p. 112.

[29] Simplicio, *De cælo.*

[1] C. E. Raven, *Science, Religion and the Future,* p. 21.

[2] Según Bury, sólo la quinta parte. *History of the Later Roman Empire,* I, 366.

[3] No parece que hiciera esto por ninguna convicción intelectual ni conversión moral, sino meramente porque el uso de un emblema cristiano parecía aportarle la victoria en el campo de batalla. Relata Eusebio que Constantino y sus tropas vieron una cruz flamígera en el firmamento con la inscripción ἐν τούτῳ νίκα ("con este signo vencerás"), y que, habiendo puesto este emblema en sus estandartes, ganó cuatro victorias en rápida sucesión.

[4] Lecky, *History of European Morals,* II, 13.

[5] No obstante, véase p. 36.

[6] "Si una línea recta encuentra a otras dos líneas rectas de manera que los ángulos interiores de un lado de aquélla sumen menos que dos ángulos rectos, entonces las otras dos líneas rectas se encontrarán si se prolongan indefinidamente por el lado en que los dos ángulos suman menos de dos ángulos rectos."

[7] Para esta cuestión véase W. W. Rouse Ball, *A Short Account of the History of Mathematics,* p. 67.

[8] Arquímedes dijo que las fórmulas de los volúmenes de la pirámide y del cono las dio primeramente Demócrito, pero sin demostración, y que fue Eudoxio el que primero las demostró. Pero la fórmula del volumen de una pirámide se encuentra en el papiro de Moscú (p. 22), por lo menos 2 000 años más antiguo, como lo es también la fórmula del área del hemisferio (p. 22).

[9] Sir T. L. Heath, *Manual of Greek Mathematics,* pp. 295-309.

[10] Como el alfabeto griego contenía solamente 24 letras, fue necesario suplementarlas con dos letras griegas anticuadas y

una letra fenicia.

[11] Ψαμμίτης (*El contador de arena*).

[12] Sir T. L. Heath, *Manual of Greek Mathematics,* p. 415.

[13] Herón había anunciado que el área del triángulo cuyos lados son *a, b* y *c,* es:

$$\tfrac{1}{4}\sqrt{(a+b+c)(-a+b+c)(a-b+c)(a+b-c)}$$

forma de representación que los griegos primitivos hubieran encontrado carente de significación, puesto que se necesita un espacio de cuatro dimensiones para su representación geométrica. Pero esta forma de presentación era tan desusada que Herón pidió excusas por multiplicar cuatro factores, cuando en un diagrama sólo podían representarse tres.

[14] Arquímedes, Ψαμμίτης (*El contador de arena*).

[15] En realidad, Asúan no está exactamente en el trópico, como determinó Eratóstenes, sino a unas 40 millas al norte de aquél, y no está derechamente al sur de Alejandría, sino a unas 180 millas al este; la diferencia de latitud entre los dos lugares no es de 7° 12′, sino de 6° 53′. El primer error de 40 millas ocasiona sólo un error de 2 000 millas en la circunferencia del globo.

[16] Esto da, en efecto, la longitud de la cuerda que subtiende un ángulo dado en el centro de un círculo.

[17] El título original era μεγάλη σύνταξις τῆς ἀστρονομίας pero algunos traductores del griego parece que cambiaron μεγάλη en μεγίστη, lo cual puede haber cambiado algún árabe en *al megiste,* y de aquí el nombre usual.

[18] Véase la nota 16.

[19] Por lo menos así es como lo expresamos en nuestro lenguaje moderno. Verdaderamente, Ptolomeo siguió a Euclides

en la idea de que los rayos de luz eran emanaciones de los ojos, los cuales sondeaban el espacio hasta que caían sobre el objeto visto, de suerte que aquél diría que los rayos de luz se desvían cuando pasan de la atmósfera baja densa al aire enrarecido de arriba.

[20] La ley de Ptolomeo era $\vartheta' = \mu\vartheta - \nu\vartheta^2$, en lugar de la ley correcta, que es: sen$\vartheta' = \mu$senϑ, a la cual se aproxima muchísimo cuando los ángulos a que se refiere son pequeños (p. 234).

[21] Dampier, *A History of Science,* pp. 55 y ss.

[22] Excelentes e imaginarios ejemplos se pueden hallar en la novela *Hypatia,* de Kingsley.

[23] Gibbon, *Decline and Fall of the Roman Empire,* cap. XXXVII.

[24] *Ibid.,* XXXVIII.

[25] Lecky, *History of European Morals,* II, 13.

[26] Gibbon, *loc. cit.,* cap. XLI.

[1] Véase la nota 16 del capítulo anterior.

[2] Este tratado estaba escrito en verso y parcialmente en forma de diálogo con su hija, a la cual no permitió nunca apartarse de su presencia con objeto de evitar que se casara. Por ejemplo: "Amada y querida Lilavati, de ojos como los de una gacela; dime cuáles son los números que resultan de 135 multiplicado por 12. Si tú eres hábil en multiplicación… dime, feliz damisela…" (Véase W. W. R. Ball, *A Short Account of the History of Mathematics,* p. 147.)

[3] Dampier, *History of Science* (3ª ed., p. 79).

[4] *Short History of Science,* p. 132.

[5] *Al-gebr we'l mukabala.* La primer palabra del título, de la cual se ha derivado nuestra palabra *álgebra,* significa restauración, y se refiere a la transferencia de una cantidad desde un miembro de una ecuación al otro por el procedimiento de añadir la misma cantidad a los dos miembros de la ecuación, o restar la misma cantidad a los dos miembros.
El álgebra es una de las pocas excepciones a la regla general de que las ciencias toman sus nombres de la lengua griega: aritmética, geometría, trigonometría, física, astronomía, y así sucesivamente.

[6] *Algebra et Almuchabala,* o *Liber Abaci* (1202).

[7] H. A. L. Fisher, *A History of Europe,* p. 272.

[8] Las fechas tenidas como "oficiales" son: París, 1200; Oxford, 1214; Nápoles, 1224; Cambridge, 1231; Padua, 1238.

[9] El matemático verá que esto está muy lejos de ser un juego de niños. Si la solución es x tenemos entonces que $x^2 + 5$ y $x^2 - 5$ deben expresarse $x^2 + 5 = (x + y)^2$, y $x^2 - 5 = (x - z)^2$. Eliminando x en estas dos ecuaciones, obtenemos:

$$\frac{5}{z+y} = \frac{yz}{z-y}$$

y cada fracción es igual a $\frac{\sqrt{5^2-(yz)^2}}{2\sqrt{(xz)}}$. Probablemente *x*, *y*, *z* deben todas ser comensurables, cuya condición queda satisfecha si $5^2 - (yz)^2$ y *yz* son, ambos, cuadrados perfectos.
Una solución evidente es $yz = 4$, que lleva directamente al valor hallado por Leonardo para *x*.

[10] Leonardo todavía empleó el sistema sexagesimal de los antiguos babilonios y expresó su solución así: $x = 1\ 22'7''42'''4^{v}40^{vi}$.

[1] Véase p. 218.

[2] En su *De placitis philosophorum* escribe Plutarco: "Aristarco sitúa al Sol entre las estrellas fijas y considera que la Tierra se mueve alrededor del Sol". La primera traducción auténtica de esta obra se publicó en el libro de Georg Valla, *De expetendis et fugiendis Rebus* (1501), de la cual tomó Copérnico un diagrama y una descripción casi al pie de la letra de Aristóteles y de Aristarco sobre la inmensidad del universo.

[3] Melancthon argumentaba como sigue: "Cuando un círculo gira, su centro permanece inmóvil; pero la Tierra está en el centro del mundo, por consiguiente está inmóvil". Lutero escribió: "Se dice en la Sagrada Escritura que Josué paró el Sol, no la Tierra". Véase H. Kesten, *Copernicus and his World,* Londres, 1945.

[4] *Initia dodrinæ physicæ,* 1544.

[5] *Hypotheses orbium cœlestium,* 1551.

[6] Véanse dos libros en polaco, *Twórca Nowego Nieba* ("El Creador de un Nuevo Cielo"), por Jeremi Wasiutynski (1938), y *Nicolas Kopernik,* por Ludvik Birkenmajer (1900). Agradezco al señor Tadeusz Jarecki que me haya dado noticias de estos dos libros, y por extractos de ellos que ha tenido la bondad de traducir para mí.

[7] *Mathematical Collections and Translations,* Salisbury, 1661.

[8] Cooper, *Annals of Cambridge,* III, 536.

[9] "De nova Stella", *Opera,* t. I.

[10] *Ibid.,* t. I.

[11] *On our Sublunary World, a New Philosophy.*

[12] *De facie in orbe lunæ.*

[13] *Horologium oscillatorium,* 1673.

[14] *Trattato generale di numeri et misure* (1556).

[15] *Artis magnæ, sive de Regulis Algebræ, liber unus.*

[16] La solución de la ecuación de tercer grado es asunto tan sencillo que no debiera haber causado tal conmoción. Toda ecuación de tercer grado $x^3 + px^2 + \ldots = 0$, puede reducirse a la forma $y^3 + qy = r$ poniendo $y - \frac{1}{3}p$ en vez de x. Comparando esta ecuación con la sencilla fórmula $(a - b)^3 + 3ab(a - b) = a^3 - b^3$, veremos que $a - b$ será una solución de la ecuación si a y b se eligen de tal modo que $3ab = q$ y $a^3 - b^3 = r$.

[1] Wolf, *A History of Science, Technology and Philosophy in the Sixteenth and Seventeenth Centuries,* p. 55.

[2] G. N., Clark, *Science and Social Welfare in the Age of Newton,* p. 15.

[3] Pepys, *Diary.*

[4] Pero hasta entonces no había prueba alguna de la rotación del Sol.

[5] *Astronomia Philolaica,* París, 1645.

[6] Wolf, *loc. cit.,* p. 75.

[7] *Sidereus nuncius.*

[8] *Dioptrica,* 1611.

[9] De acuerdo con la clasificación de Hiparco, son las más débiles estrellas visibles a simple vista, y por lo tanto las más pequeñas que pudieron verse en todos los tiempos pretelescópicos.

[10] *Sidereus nuncius,* 1610.

[11] Aristóteles, *Meteorologica.*

[12] Algunas autoridades han sostenido que esta prohibición no le fue comunicada a Galileo, e incluso que todo el episodio de la admonición y la prohibición ha sido inventado, lanzado a los vientos en fecha posterior para excusar los procedimientos de 1633 (véase especialmente Emil Wohlwill, *Dei Inquisitionsprocess des Galileo Galilei,* Berlín, 1870). La afirmación de Galileo mismo fue: "Hace algunos años se había publicado en Roma un saludable Edicto, el cual, para evitar los peligrosos escándalos de la edad presente, imponía un razonable Silencio acerca de la Opinión Pitagórica de la Movilidad de la Tierra, yo estaba en Roma en aquella ocasión, y no sólo tuve Audiencias sino Aplausos de los Prelados más eminentes de esta Corte; ni fue publicado aquel Decreto sin darme previo aviso de él". (Galileo,

Diálogo sobre los dos principales sistemas del mundo, traducido al inglés por Salusbury, 1661.)

[13] Por lo que sabemos, esta leyenda se publicó por vez primera en el año 1761, en las *Querelles littéraires* del abate Iroilli.

[14] Porque 60° es la sexta parte de la circunferencia, y cuatro horas es la sexta parte de un día, que es la posición de una sexta parte del camino alrededor del mundo partiendo de Greenwich.

[15] Sir H. Spencer Jones, *The Royal Observatory,* Greenwich, 1944.

[16] Cuando estaba destinado en Breda se fijó en un cartel que había en una calle, escrito en holandés, y rogó a un transeúnte que se lo tradujera. Resultó que contenía un problema matemático y un desafío a todos los matemáticos del mundo, a resolverlo. El transeúnte, que era Beeckman, director del colegio de Dort, dijo que estaba dispuesto a hacer la traducción si Descartes quisiera buscar la solución a aquel problema. Descartes lo hizo en pocas horas y esta prueba evidente de su capacidad matemática lo estimuló para dedicarse nuevamente a las investigaciones matemáticas de sus primeros tiempos.

[17] *Discurso del método,* parte VI, 1637.

[18] Principia philosopliæ, parte II, § 15. Sería un argumento paralelo el decir que la fundamental propiedad de una locomotora es el movimiento, *ergo* el movimiento sin una locomotora es inconcebible.

[19] *Principia,* II.

[20] *De facie in orbe lunæ.*

[21] *Theoricæ mediceorum planetarum* (1666). Trata éste principalmente del movimiento de los satélites de Júpiter a los cuales había llamado Galileo planetas mediceos.

[22] Brewster, *Memoirs of Sir Isaac Newton,* I, 287.

[23] Casi un litro. [E.]

[24] En un manuscrito citado en el prólogo de *A Catalogue of the Newton MSS., Portsmouth Collection* (Cambridge, 1888), p. XVIII. Este manuscrito se escribió probablemente hacia el año 1716.

[25] Paréntesis del autor. [E.]

[26] Éste es el famoso *teorema del binomio* (véase p. 262).

[27] Se trata del cálculo diferencial de hoy, el más famoso y el más importante de los descubrimientos matemáticos de Newton.

[28] *Stukeley's Memoirs of Sir Isaac Newton's Life* (ed. por A. H. White, 1936), p. 19.

[29] Las aficiones de Newton y lo que le interesó parecen haber sido de suma seriedad. Debió de carecer por completo de buen humor; rara vez reía o bromeaba. En la única anécdota que se conoce respecto de su risa (contada dos veces, véase Brewster, *Memoirs,* II, 91), Newton no se reía con un amigo, sino de éste, porque no podía comprender la utilidad de estudiar a Euclides. Por el inventario de los libros y los muebles de Newton hecho después de su muerte sabemos que no tenía afición alguna al arte, la música, la literatura o la poesía (Villamil, *Newton the Man*), y parece que igualmente careció de interés por la vida del campo, los animales, el ejercicio, los deportes y los juegos, lo mismo caseros como de fuera de casa. Era extremadamente descuidado tanto en el vestir como en la alimentación. No contrajo matrimonio y su relación con el sexo opuesto nunca pasó de cierta relación de niño y niña. Puede muy bien ser que sus intensos esfuerzos intelectuales lo dejaran con muy escasa energía mental para intereses más humanos, y con frecuencia con muy poca, incluso, para su ciencia.

[30] Su amanuense, Humphrey Newton, escribió (Brewster, *Memoirs,* II, 93) que "en primavera y a la caída de la hoja [...]

acostumbraba pasar unas seis semanas en su laboratorio apagando rara vez el fuego ni de día ni de noche, al trabajo de noche él y yo alternando, hasta que terminaba sus experimentos químicos, en cuya ejecución era de lo más seguro, estricto y exacto. No fui capaz de penetrar lo que perseguía, pero sus esfuerzos, su diligencia en aquellas series de trabajos me hicieron pensar en que apuntaba a algo fuera de alcance para el arte y la industria humana". "Algunas veces, aunque muy raras, echaba una ojeada a un viejo libro mugriento que había en su laboratorio, que me parece se llamaba *Agricola de metallis,* siendo su principal propósito la transmutación de metales." Todo el tiempo y energía que empleó Newton en estos menesteres no le dieron sino resultados insignificantes; nada original publicó sobre química, y no tuvo éxito alguno en alquimia, al menos que se haya conocido, si es que realmente estuvo tan interesado en estas cuestiones, como parece haber pensado su amanuense. (Para el estudio de la obra de Newton y de su interés en química, véase Douglas McKie, "Some notes on Newton's chemical philosophy", *Phil. Mag.,* diciembre, 1942.)

[31] *Die Mechanik in ihrer Entwickelung historisch-kritisch dargestellt,* 1883.

[32] En sus dos libros, *Le Monde* (escrito en 1630, o hacia este año, pues no fue publicado hasta 1664), y *Principia philosophiæ,* publicado en 1644.

[33] Preámbulo de la *Óptica* de Newton, reeditada en 1931.

[34] *Ensayos de Jean Rey, doctor en medicina, sobre la investigación de la causa por la cual el estaño y el plomo aumentan de peso cuando se les calcina.*

[35] *El químico escéptico: o dudas químico-físicas* y *paradojas tocantes a los experimentos por medio de los cuales los espagíricos vulgares están acostumbrados a tratar de convencer de que su sal, azufre y mercurio son los verdaderos principios de las cosas.*

[36] *Origen de las formas y de las cualidades* (1666).

[37] Newton debió de estar familiarizado con estos nuevos métodos, porque había leído la *Geometría* de Descartes, a pesar de lo cual no los empleó en los *Principia;* pero demostró sus teoremas por los métodos de la geometría antigua, posiblemente con la intención de que fueran, de este modo, comprendidos con más facilidad. Presenta algunos en tal forma que sugiere haber sido descubiertos por medio de los nuevos métodos, y después traducidos al lenguaje de los antiguos.

[38] Existe una pequeña complicación cuando pasamos por *A* o por *B,* pero esto no nos interesa por ahora.

[39] El matemático verá que los gérmenes del cálculo integral ya habían salido a la superficie; Wallis había hallado los valores de las cantidades que ahora representamos por $\int x^m dx$, $\int (1 - x^2)^m dx$, y $\int (a + bx + cx^2 + cx^3 + \ldots)dx$. Poco tiempo después, Pascal dio los valores exactos de las cantidades que hoy representamos por $\int \text{sen}\varphi\, d\varphi$, $\int \text{sen}^2\varphi\, d\varphi$ y $\int \varphi\, \text{sen}\varphi\, d\varphi$.

[40] *Date equatione quotcunque fluentes quantitates involvente, fluxiones invenire et vice-versa.*

[1] *Essai de Cosmologie,* 1751, p. 70.

[2] *Vis viva* significa el doble de la cantidad que hoy conocemos como energía cinética, esto es, la cantidad obtenida multiplicando la masa de un cuerpo en movimiento por la mitad del cuadrado de su velocidad, y sumando las contribuciones de todos ellos. En lenguaje matemático, *vis viva* es Σmv^2.

[3] *A Short Account of the History of Mathematics,* p. 426.

[4] *Óptica,* pregunta 31, p. 402.

[5] Así lo creía Laplace; pero después se ha encontrado que todos los cuatro mayores planetas, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, poseen satélites que no se hallan en conformidad con esta regla.

[6] *Allgemeine Naturgeschichte,* 1755.

[7] Presentando la crítica en forma más precisa: la mecánica newtoniana requiere que una cierta magnitud matemática, el momento angular total, permanezca inalterable a través de todas las variaciones del sistema. La teoría nos dice el valor que ha de tener esta magnitud para que el Sol se rompa por exceso de rotación, en tanto que la observación nos dice qué valor tiene ahora. Los dos no son iguales; ni aun comparables, de suerte que el Sol no puede haberse roto a la manera que imaginó Laplace.

[8] *An original Theory or new Hypothesis of the Universe* (1750).

[9] Sabemos hoy que es nueve veces más brillante, intrínsecamente, que el Sol, y que su distancia es de 15 años luz.

[10] *Discurso sobre las diferentes figuras de los astros,* 1742.

[11] *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels,* 1755.

[12] *D.N.B. (Dic. de Biog. Not.),* artículo “Thomas Young”.

[13] “On the theory of light and colour”, *Phil. Trans.,* 1801.

[14] Por el principio general que dice que cuando una cantidad que varía constantemente pasa por su valor mínimo, su coeficiente de variación toma momentáneamente el valor cero, el paso del decrecimiento al aumento debe ser mediante una pausa en la cual no hay ni decrecimiento ni crecimiento. Kepler estuvo familiarizado con este principio general, pero sin que jamás lo formulara de modo claro. Se le dio precisión completa con el cálculo diferencial, el cual establece que, cuando una variable alcanza un valor máximo o mínimo, su coeficiente diferencial tiene de valor cero.

[15] *Traité de la Lumière,* cap. I.

[16] *Experiments upon Magnesia Alba, Quicklime and some other alcaline substances.*

[17] Wilhelm Scheele, farmacéutico sueco, había publicado un *Tratado sobre el aire y el fuego,* en 1777, en el cual probaba que el aire consiste en una mezcla de dos gases que hoy conocemos como oxígeno y nitrógeno. Había hecho la mayor parte de sus experimentos antes de 1773, y, por tanto, pudo haber hallado el oxígeno antes de que lo hiciera Priestley en 1774, pero no hay duda de que Priestley fue el primero en publicar el descubrimiento.

[18] *Óptica,* pregunta 31.

[19] *Three Philosophers (Lavoisier, Priestley and Cavendish),* W. R. Aykroyd, 1935.

[20] Dalton dio este y otros ejemplos de su teoría, con frecuencia inexactos los números dados, pero los principios perfectamente sólidos.

[21] Dalton dijo siete veces, debiéndose en parte su error a que creía que la molécula de agua constaba de un solo átomo de hidrógeno combinado con un solo átomo de oxígeno.

[22] *On the Calorific Effects of Magneto-Electricity and on the Mechanical Value of Heat,* 1843.

[23] Fue anunciado primeramente al mundo en una conferencia popular en la sala de lectura de una iglesia, y se dio a publicidad por primera vez en un semanario de Manchester.

[24] *New Experiments Physico-Mechanical Touching the Spring of the Air and its Effects,* 1660.

[25] *Syntagma philosophicum* (*Opera* 1, 1658).

[26] Hubo asimismo un importante escrito que el físico inglés J. J. Waterston sometió a la Royal Society en 1845. Este escrito contenía un cálculo de la presión y temperatura de un gas en relación con la velocidad y la masa de sus partículas. Tenía muchos errores, y en parte por esta razón, pero en realidad por no haber sabido apreciarlo posteriormente, no se publicó hasta 1892, cuando se imprimió por su interés histórico.

[27] Sarton, *Introduction to the History of Science,* p. 756.

[28] *Philosophia magnetica,* II, 21.

[29] *Experimenta nova Magdeburgica de vacuo Spatio.*

[1] El tiempo invertido en la doble jornada de longitud l sería, naturalmente,

$$\frac{l}{300000 - x} + \frac{l}{300000 + x}$$

que es mayor que $\frac{2l}{300000}$ por un incremento de

$$\frac{2l}{300000} \times \frac{x^2}{(300000)^2 - x^2}$$

[2] Para que la compensación fuera exacta, la contracción tenía que estar en la relación de $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ a 1, en la que v es la velocidad de movimiento y c es la velocidad de la luz.

[3] Se sabe hoy que se estimó muy por lo bajo; el verdadero valor se eleva a 1 840, aproximadamente.

[4] También descrito como radio F.

[5] Rutherford, "Teoría de la estructura atómica", ensayo publicado en *The Background to Modern Science,* p. 69.

[6] La desviación magnética es inversamente proporcional a la velocidad del átomo en movimiento, y el desplazamiento eléctrico lo es al cuadrado de la velocidad. Por lo tanto, la desviación eléctrica es proporcional al cuadrado de la desviación magnética, y está en ángulo recto con ésta, de suerte que la curva es una parábola.

[7] La frecuencia de una vibración es el número de vibraciones por segundo.

Índice

En los últimos años de su vida, James Jeans escribió este libro, por el que desfilan, sugestivas, las fases de la gran hazaña del hombre que, al correr de los siglos y sólo con el recurso de su genio, consiguió edificar la colosal fábrica de la física de nuestros días.

Junto al estudio del desarrollo de la física, el autor da cuenta del de otras ciencias, estrechamente vinculadas —las matemáticas, la astronomía, la química—. Al mismo tiempo nos presenta el maravilloso hallazgo de principios fundamentales y de los avances más importantes del progreso científico: las propiedades de la circunferencia, el teorema de Pitágoras, las secciones cónicas, el sistema de numeración arábica, el nacimiento del álgebra: la aparición, tras la alquimia, de la ciencia experimental, complemento y estímulo de la ciencia de mera observación; el descubrimiento de los logaritmos, de la geometría analítica, del cálculo, la invención del péndulo, del telescopio, del espectroscopio, de la cámara de Wilson, y sin omitir, en el aspecto humano, la lucha dramática que en no pocos casos hubieron de sostener los forjadores de la ciencia.

James Jeans (Inglaterra 1877–1946), físico, astrónomo y matemático británico, realizó importantes contribuciones en muchas áreas de la física, incluyendo la teoría cuántica, la teoría de la radiación y la evolución estelar.

www.fondodeculturaeconomica.com

ÍNDICE